



Fuels..Furnaces..Refractories ..

• الوقود

• الأفران

• الحرارية



مهندس استشاري

محمد أحمد خليل

SB74

الوقود.

الأفران.

الحراريات.

مهندس استشاري

محمد احمد خليل

الكتاب :	الوقود - الأفران - الحرارية
المؤلف :	م. محمد أحمد خليل
الناشر :	دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع - القاهرة
المقاس :	٢٤ X ١٧
عدد الصفحات :	٤٠٨
الطبعة :	الأولى
رقم الإيداع :	٢٠٠٦/٢٣١٩٤
تدمك :	٩٧٧ ٢٨٧ ٦٨٦ ٨
ديوى :	

الإخراج الفني وتصميم الغلاف : جمال خليفة
المونتاج الفني : محمد حسنى

© حقوق النشر والطبع والتوزيع محفوظة لدار الكتب العلمية للنشر والتوزيع - ٢٠٠٧

لا يجوز نشر جزء من هذا الكتاب أو إعادة طبعه أو اختصاره بقصد الطباعة أو اختزان مادته العلمية أو نقله بأى طريقة سواء كانت إلكترونية أو ميكانيكية أو بالتصوير أو خلاف ذلك دون موافقة خطيه من الناشر مقدماً .

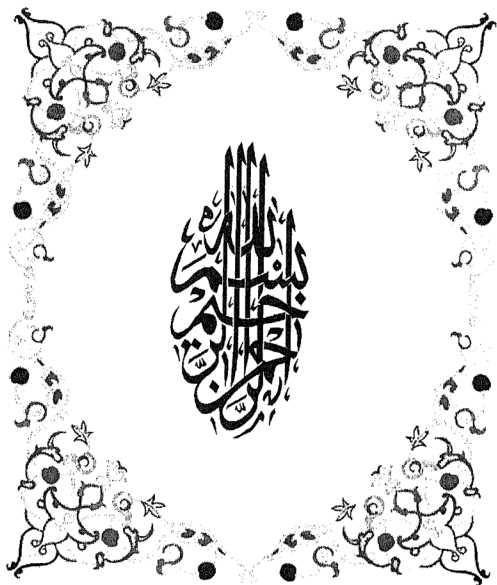
دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع

٥٠ شارع الشيخ ربحان - عابدين - القاهرة

٧٩٥٤٢٢٩ ☎

لمزيد من المعلومات يرجى زيارة موقعنا على الإنترنت

e-mail : sbh@link.net



تقديم

تم فى هذا الإصدار تناول موضوعات الوقود والأفران والحراريات وذلك لما لهذه الموضوعات الثلاث من أهمية بالغة فى جميع العمليات الصناعية والتنمية وخاصة فى عمليات الصناعات المعدنية والغلايات التى تجمع بين هذه الموضوعات الثلاث.

وتم اعداد هذا الإصدار فى ثلاث أبواب حيث شمل الباب الأول على أنواع الوقود واستخداماته الصلب والسائل والغاز وفى الباب الثانى تم تناول انواع الأفران المختلفة مع التركيز على عملية ترشيد الطاقة سواء بالنسبة لتصميم الأفران أو استعمالاتها أما الباب الثالث فقد تم فيه دراسات تفصيلية عن أنواع الحراريات من المواد الخزفية والمعدنية والغير معدنية وخصائصها واستعمالاتها . ويعتبر هذا الإصدار إضافة إلى المكتبة العربية يستفاد به فى تلك المجالات.

والله الموفق

مهندس استشارى
محمد أحمد خليل

الباب الأول

1

الوقود

●● محتويات الباب :

- (٩) الفصل الأول : مقدمة عن الوقود وتقسيماته
- (٣٩) الفصل الثاني : الوقود الصلب
- (٧٢) الفصل الثالث : الوقود السائل
- (١١٦) الفصل الرابع : الوقود الغاز

الفصل الأول

1

مقدمة عن الوقود وتقسيماته

١- عام :

المادة التي تنتج حرارة تسمى وقود. الحرارة يمكن إنتاجها إما بالحرق أو بالانشطار أو الاندماج النووي (Nuclear Fission and Fusion). الحرارة الناتجة عن احتراق الوقود تستخدم إما مباشرة أو أن يتم تحويلها إلى طاقة ميكانيكية أو طاقة كهربائية. الوقود هو المصدر الرئيسي للطاقة في الصناعة. ينقسم الوقود إلى أربع أنواع رئيسية وهي:

الوقود الحفري (Fossil)، ناتج العمليات (By Products)، الكيماوي، النووي ب. الثلاث الأولى تنتج الحرارة بالحرق في وجود الهواء أو الأكسجين. الوقود النووي يطلق حرارة بالانشطار النووي أو الاندماج النووي وذلك بتحويل الكتلة إلى طاقة. الوقود الحفري هو المنتج من بقايا الحفريات للنبات والحيوان ويوجد في القشرة الأرضية مثل الفحم، البترول والغاز الطبيعي. الخ. وقود ناتج العمليات هو الناتج عن بعض العمليات الصناعية ولكن بشكل ثانوي. مثل غاز فرن الكوك و غاز الفرن العالي وهذه غازات ناتجة في عملية الكوك وعملية صناعة الحديد. الوقود الكيماوي له طبيعة

غريبة وعادة لا يستخدم في العمليات التقليدية. مثل الهيدرازين (Hydrazine - وهو وقود الصواريخ) وكلك نترات الأمونيا، الفلورين...الخ.

الوقود النووي المنتج للحرارة بالانشطار هو اليورانيوم والبلوتونيوم... الخ والمنتج للحرارة بالاندماج هو الديتريوم والتريتيوم (Deuterium and Tritium) وكلاهما من نظائر الهيدروجين (Isotopes of H2)....الخ. وفي كلا الحالتين تتحول المادة إلى طاقة. وطبقاً لحالة الاستخدام فإن الوقود ينقسم إلى الوقود الأولي والوقود الثانوي. الوقود الأولي هو ذلك الذي يوجد في الطبيعة مثل الفحم، الخشب، البترول، الغاز الطبيعي....الخ. الوقود الثانوي هو الذي يتم إنتاجه من الوقود الأولي مثل الكيروسين المنتج من البترول وغاز فرن الكوك الذي ينتج من الفحم....الخ.

الوقود الثانوي ينقسم إلى الوقود المصنع أو كمنتج ثانوي (By Product). الوقود المصنع هو الذي ينتج لغرض معين مثل الكوك (لصناعة الحديد)، الجازولين (لمحركات الاحتراق الداخلي)، الغاز المنتج (Producer Gas) والذي يستخدم في التسخين الصناعي...الخ. الوقود كمنتج ثانوي هو ذلك المنتج المصاحب الذي لا يمكن تجنبه في عملية التصنيع المنتظمة مثل، غاز تكرير البترول، لباب قصب السكر بعد عصره (Bagasse)، القار...الخ. وقود المنتج الثانوي أو الإضافي يساعد الصناعة في المحافظة على الوقود الأولي.

الجدول الآتي يوفر بيان بتقسيم الوقود (باستثناء الوقود الكيماوي والنووي)

تقسيمات الوقود:

التقسيم العام	وقود أولي	وقود ثانوي
	طبيعي	مصنع
الصلب	خشب	الكوك
	فحم	فحم نباتي أو حيوان (Charcoal)
		الفحم المطحون
		مخلفات الخشب
		مخلفات القصب
		حبيبات الكوك
		مخلفات الحبوب

1

التقسيم العام	وقود أولي	وقود ثانوي
السائل	زيت البترول	الفحم النباتي أو الحيواني
	بنزين السيارات فازلين كحول وقود غروي سولار نافتا زيت نباتي	القار مخلفات ماكينة تصنيع لب الورق
الغاز	الغاز الطبيعي	غاز الفرن العالي غاز الفرن العالي غاز فرن الكوك غاز تكرير البترول غاز مخلفات الصرف الصحي
	الغاز المنتج غاز الماء غاز الماء المكربن غاز الفحم الحجري (Coal Gas) غاز الزيت غاز جوبار الغاز الطبيعي المعدل الببوينين البروبين الأسيتيلين الهيدروجين	

الوقود النووي من نوعين: أحد النوعين يمكن أن يطلق حرارة عند انشطاره بتصادم نيوترون. هذا الوقود يسمى الوقود الانشطاري (Fissile Fuel) مثل اليورانيوم ٢٣٣ ، اليورانيوم ٢٣٥، البلوتونيوم ٢٣٩. يوجد بعض من الوقود النووي مثل الثوريوم ٢٣٢، اليورانيوم ٢٣٨ والتي لا يمكن أن تنشط مباشرة، ولكن يمكن تحويلها إلى مادة انشطارية مثل اليورانيوم ٢٣٣ والبلوتونيوم ٢٣٩. مثل هذا الوقود

النووي يسمى الوقود المخصب (Fertile). ما زال هناك نوع آخر من الوقود النووي الذي يطلق الحرارة بالاندماج (By Fusion) مثل الديتريوم (Deuterium) والتريوم (Tritium) وكلاهما من النظائر المشعة للهيدروجين، والهيدروجين...الخ. ولكن في كلا الحالتين ما إذا كان الوقود سيحدث له انشطار أو اندماج فإنه يحدث تحول الكتلة إلى طاقة حيث تنطلق الحرارة.

طبقاً للاستخدام، فإن الوقود ينقسم إلى وقود منزلي، ووقود إضاءة، ووقود صناعة، ووقود الصاروخ...الخ.

الوقود المنزلي يوفر الحرارة لإعداد الطعام والتدفئة. وقود الإضاءة مثل الكيروسين يوفر الضوء في الظلام...الخ الوقود الصناعي يوفر الحرارة لتسخين العمليات الصناعية، وتوليد البخار والكهرباء...الخ. وقود الصاروخ مثل الهيدرازين يستخدم في إنتاج الدفع العالي لقذف الصاروخ. وبالنسبة لتقسيم آخر، فإن الوقود المنتج للحرارة بالحرق يسمى الوقود الكيميائي والمنتج للحرارة بالانشطار أو الاندماج النووي يسمى الوقود النووي.

٢- الأساسيات والتعاريف ووحدات التحويل:

يلزم التعرف على المصطلحات الأولية لدراسة هذا الموضوع طبقاً للآتي:

رتبة الفحم: هذا يعني نضج الفحم (Maturity). الفحم يتكون من مادة نباتية التي تحولت إلى الفحم خلال مراحل مختلفة من النضج والتي تسمى الخشب الصخري أو فحم المستنقعات (Peat)، الفحم البني (Lignite)، القاري أو البيتوميني (Bituminous)، الأثرائيت وهو الفحم الصلب أعلى رتبة الفحم الأدنى في النضج ولذلك يكون في أدنى درجة. بينما يكون فحم الأثرثا ثيت يدل على درجة نضجه أو درجة تحوله.

التفحم أو التحول: (Coalification, or Metamorphism):

وهي عملية تحول اللجنيت (الفحم البني) إلى فحم الأثرثاسيت (الفحم النقي).

كربنة الفحم: (Carbonisation of Coal): تسخين الفحم في معزل عن الهواء عند درجة

حرارة عالية لإنتاج الكوك، القار والغاز يسمى كربنة الفحم.

الفحم الكوكي وفحم الكوك:

عند كربنة مسحوق الفحم (أي تسخينه بمعزل عن الهواء) فإنه يكون كتلة مستمدة في بعض الحالات. مثل هذا الفحم يسمى الفحم الكوكي (Caking - أي الذي يتحول إلى كوك). وعندما يكون المتبقي شديد الصلابة والقوة فإنه يسمى الكوك وتسمى العملية التكويد (Coking). يسمى الفحم فحم الكوك. كل أنواع الفحم الكوكي لا تكون متبقي صلب وقوي وملتصق من الكوك. لذلك فإن كل الفحم الكوكي ليس بالضروري فحم تكويد ولكن كل فحم التكويد يجب أن يكون بالضرورة كوكي بطبيعته.

عند كربنة الفحم فإن الفحم الكوكي يبدأ في التمدد ثم الانكماش قليلا تاركا متبقي أضخم وأضعف ومسامي. عند كربنة الفحم الكوكي فإنه يتمدد أولا ثم ينكمش إلى درجة كبيرة (أكثر من مجرد فحم كوكي) ليكون متبقي قوي ومدمج وأقل نفاذية نسبيا. عملية الفحم الكوكي (Caking) يقابلها معدل التسخين البطيء بينما التكويد (Coking) يقابلها معدل أسرع في التسخين. كل فحم التكويد هو أساسا فحم بتيوميني أو قاري. الفحم الكوكي القوي يسمى فحم الكوك.

الفحم الغير كوكي أو الفحم الغير مكوك: (Non-caking/ Non-coking coals)

هذا الفحم الذي لا ينصهر يكون كتلة غير منتظمة (Lumpy) ومتبقي متلاصق / مدمج وفحم غير مكوك / غير كوكي.

قواعد تقرير تحليل الفحم: تستخدم القواعد التالية:

1. الفحم الخام المنتج من منجم الفحم يسمى (Run-of-Mine coal). ولا يتم له معالجة مثل خفض الحجم، التخلص من الرطوبة...الخ.
2. عند استلام الفحم من المنجم بواسطة المستهلك يتم عندئذ تحليله مع تسجيل الخواص الأخرى بعد استلامه. أثناء نقل الفحم من المنجم إلى المستهلك يحدث

كثيراً من التغيرات الطبيعية والكيميائية وكذلك عند تشغيله مثل خفض الحجم، الغسيل، التعرية...الخ. لذلك فإنه عند المستخدم يتم تسجيله على أساس الاستلام (As-received basis).

٣. التجفيف الهوائي: الفحم حديث الخروج من المنجم يأخذ هواء ويجف لتعرضه للشمس أثناء النقل لذلك فإن محتواة من الرطوبة يتغير طبقاً لدرجة حرارة ورطوبة الجو. في الحقيقة فإن البيانات على أساس الاستلام وعلى أساس الجفاف قد تكون متساوية لأن الفحم يفقد رطوبته بسبب التعرض للهواء الجوي أثناء النقل والتخزين.

ولذلك للحصول على نتائج دقيقة وقابلة للمقارنة فإن الفحم يتم تعريضه إلى جو صناعي وقياسي ٤٠ °م، ٦٠ % رطوبة نسبية للحصول على بيانات الجفاف الهوائي. حتى بعد الجفاف الهوائي فإن الفحم يحتوي على بعض الرطوبة.

٤. الفحم الجاف: عند التخلص تماماً من تأثير الرطوبة على البيانات التحليلية عندئذ فإن تحليل الفحم يسجل على أساس الجفاف التام (Dry Basis).

٥. الخلو من الرماد عند الجفاف: تأثير الرماد والرطوبة في الفحم يتم إيجادها بتسجيل البيان على أساس التخلص من الرماد الجاف هذا البيان مناسب لمقارنة الفحم النقي بالفحم ذو المحتوى المنخفض من الرماد أي أقل من ١٠ %.

٦. الخلو من المواد المعدنية عند الجفاف: في حالة الفحم ذو المحتوى العالي من الرماد (أكثر من ١٠ %)، فإن محتوى الفحم من المواد المعدنية يكون حوالي ١٠ % أكثر من المحتوى من الرماد. بينما في حالة المحتوى المنخفض من الرماد فإن المواد المعدنية يمكن اعتبارها أنها تساوي المحتوى من الرماد. لذلك، فإنه بالنسبة للفحم ذو المحتوى العالي من الرماد، فإن مقارنة الفحم النقي يمكن عملها في حالة تسجيل تحاليلها على أساس الجفاف - الخلو من المواد المعدنية بدلاً من على أساس الجفاف والخلو من الرماد.

٧. الخلو من المواد المعدنية: يمكن إبعاد تأثير المواد المعدنية الموجودة في الفحم بتسجيل البيانات على أساس الخلو من المواد المعدنية - وهي تشمل الرطوبة في الفحم.

التحليل التقريبي للفحم:

التحليل التقريبي يعني إيجاد نسبة الرطوبة، والمواد المتطايرة، والكربون المثبت والرماد بالوزن. هاذ التحليل يعطي النسب التقريبية للمكونات الرئيسية للفحم ويفيد في إقرار استخدامه لغرض معين.

التحليل الكلي للفحم:

التحليل الكلي يعني تعيين النسبة المئوية بالوزن للكربون، الهيدروجين، النيتروجين، الأكسجين، الكبريت للفحم النقي الخالي من الرطوبة ومن المواد المعدنية. هذا التحليل يعين المكونات الأولية للفحم ويفيد في تصميم معدات حرق الفحم والمهمات المساعدة.

الأحتراق: وهو تفاعل كيميائي منتج للحرارة نتيجة تفاعل الوقود مع الأكسجين أو الهواء عند درجات الحرارة العالية لتوليد حرارة.

القيمة الحرارية (السعيرية) لوحدة الوقود: (Calorific Value)

كمية الحرارة هذه (كيلو كالوري) الناتجة عن احتراق وحدة كمية من الوقود تسمى القيمة الحرارية. وحدة القيمة الحرارية هي الكيلو كالوري لكل كجرام (Kcal/Kg) للوقود الصلب أو السائل و كيلو كالوري على Nm^3 للوقود الغازي. Nm^3 تعني حجم الغاز بالمتر المكعب عند درجة الحرارة العادية والضغط العادي والذي هو صفر درجة مئوية، ٧٦٠ ملليمتر زئبق. نظرا لأن أحجام الغازات تتغير بالنسبة للضغط (طبقا لقانون بويل) ودرجة الحرارة (طبقا لقانون شارل) لذلك فإن حجمه يعبر عنه عند درجة الحرارة والضغط العادي (NTP) لتوفير قياس معياري.

القيمة الحرارية الكلية: (Gross Calorific Value)

عند ضغط ثابت يتضمن أن الحرق يحدث عند ضغط ثابت وليس عند حجم ثابت. في التعيينات العملية، فإنه يتم حرق الوقود الصلب والسائل عند حجم ثابت والوقود الغازي يحرق عند ضغط ثابت. ولكن في حالة الأفران يحدث الحرق عند ضغط ثابت. الفرق في القيمتين المتقابلتين صغير. بالنسبة للفحم، القيمة الحرارية عند ضغط ثابت يزيد عن القيمة الحرارية عند حجم ثابت بحوالي ٥,٥ كيلو كالوري/ الكيلوجرام.

القيمة الحرارية الصافية أو أدنى قيمة تسخين عند حجم ثابت هي كمية الحرارة المنتجة عند حرق وحدة كمية من الوقود عند حجم ثابت في الأكسجين المشبع ببخار الماء، المواد الأصلية والمنتجات النهائية للحرق عند درجة حرارة قياسية (٢٥ °م) والماء المنتج من الوقود الذي يكون في حالة بخار. القيمة الحرارية الصافية لذلك تكون أقل عن القيمة الحرارية الكلية بالكمية المقابلة إلى حرارة التكثيف لبخار الماء، والذي هو ٢٥ °م هو ٥٨٣,٥ كيلو كالوري/ كجرام من الماء. على أساس أن هيدروجين الماء الذي يساوي ٥,٢٥٢ كيلو كالوري على الكيلو جرام أو ٤٦٨,٩ كيلو كالوري/ حجم الهيدروجين (Nm³).

تستخدم المعادلة الآتية في حساب القيمة الحرارية الصافية من القيمة الحرارية الكلية للوقود الصلب والسائل تقريباً.

$$CN = CG - 53H$$

حيث:

Co ، CN = القيمة الحرارية الصافية والكلية بالكيلو كالوري على الكيلو جرام على التوالي.

H = نسبة الهيدروجين للفحم، بما فيه هيدروجين الرطوبة وماء تميؤ المواد المعدنية.
في حالة الوقود الغازي، تستخدم المعادلة الآتية:

$$CN = CG - 4.7 V$$

حيث:

$CG, CN =$ القيم الصافية والكلية بالكيلو كالوري / Nm^3 (أي حجم الغاز بالمترب المكعب) على التوالي.

$V =$ نسبة الحجم (مقيم كهيدروجين) للهيدروجين الكلي للوقود الغازي، بما فيه الهيدروجين المنتج من مكونات حرق أخرى.

القيمة الحرارية الصافية عند ضغط ثابت تتضمن أن الحرق حدث عند ضغط ثابت وليس عند حجم ثابت.

الغاز العادم: (Flue Gas)

الغاز العادم هو المنتجات الغازية الناتجة عن حرق الوقود.

غاز الوقود: (Fuel Gas)

كل غازات الوقود التي تحرق لتسخين الأفران، والتي عند حرقها تنتج الغازات العادمة.

السعة الحرارية والحرارة النوعية: (Thermal Capacity, Specific Heat)

السعة الحرارية للمادة تعرف بكمية الحرارة (Kcal) اللازمة لرفع درجة الحرارة لوحدة الوزن (كيلو جرام) لمادة بدرجة مئوية واحدة (١ م) مثلاً من ١٥ م° إلى ١٦ م°.

الحرارة النوعية (Specific Heat) لمادة هي النسبة بين السعة الحرارية لتلك المادة إلى السعة الحرارية للماء. الحرارة النوعية هي رقم. الحرارة النوعية للماء هي ١ م° عند ١٥,٥ م°.

الحرارة النوعية للألومنيوم (عند صفر إلى ١٠٠ م°) هي ٠,٢٢٦. هذا يعني أنه إذا أخذت عدد معين من الكيلو كالوري لتسخين عدد معين من الكيلو جرامات من الماء بعدد معين من درجات الحرارة (م)، فإنها سوف تأخذ فقط أضعاف ٠,٢٢٦ من الكيلو كالوري لتسخين نفس العدد من الكيلو جرامات من الألومنيوم بنفس رقم درجات

الحرارة °م.

كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة الحرارة لكتل متساوية من مواد مختلفة إلى نفس المستوى من درجة الحرارة تختلف ذلك لأن السعة الحرارية لكل منهم تختلف عن الآخر.

السعة الحرارية تزداد بزيادة درجة الحرارة للمادة "متوسط السعة الحرارية" "Mean Specific Heat". هي القيمة المتوسطة للسعة الحرارية بين مستويين مختلفين من درجة الحرارة.

بالنسبة للغازات، توجد قيمتين للسعات الحرارية وهي الحرارة النوعية عند الضغط الثابت (Cp) والحرارة النوعية عند الحجم الثابت (CV). يوجد اختلاف بين هاتين القيمتين (Cp > CV) بسبب المكافئ الحراري لعمل التمدد بسبب الزيادة في الحجم الناتجة عن ارتفاع درجة الحرارة.

المحتوى الحراري: (Heat Content)

هي الحرارة التي تحتويها المادة عند درجة حرارة معينة أعلى من درجة حرارة ثابتة (مقياس). يتم حسابها بضرب وزن المادة بمتوسط الحرارة النوعية في الفرق في درجات الحرارة.

قانون بويل: (Boyle's Law)

حجم كمية معينة من الغاز عند درجة حرارة ثابتة يتغير عكسيا طبقا للضغط الكلي أي:

$$P \propto 1/V \quad P_1 V_1 = P_2 V_2$$

كيلو مول (أو كيلو جزيئي):

الكيلو مول هي تلك الكمية التي وزنها بالكيلو جرام هو نفس الرقم للوزن الجزيئي للمادة.

كيلو مول (كيلو جزيئي) = وزن المادة بالكيلو جرام / الوزن الجزيئي للمادة.

قانون دالتون للضغط الجزئي: (Partial Pressure)

الضغط الكلي لأي خليط من الغازات يساوي مجموع ضغط كل مكون (يسمى الضغط الجزئي). الضغط الجزئي لكل مكون يتناسب طبقاً لتركيزه في الخليط الغازي.

الغاز المشبع:

في خليط لبخار الماء وأي غاز آخر كل ينتج ضغط يتناسب مع نسبته بالحجم ونظراً لأن الماء له ضغط بخار محدد (Definite Vapour Pressure) عند درجات الحرارة المختلفة، فإن تركيز بخار الماء في الغاز يكون محدوداً. عند الوصول إلى هذا الحد لبخار الماء فإن الغاز يسمى المشبع.

نقطة الندى للغاز: (Dew Point of Gas)

في الغاز المشبع أي انخفاض في درجة الحرارة (عند ضغط معين) يسبب تكثف (Condensation) أو تكوين الندى من بخار الماء الموجود فيه . درجة الحرارة التي عندها يظهر أن نقطة لتكثف الماء هي نقطة الندى للغاز. في الواقع، التكثف، يمكن أن يحدث بزيادة الضغط كذلك.

رطوبة الغاز: Humidity of the Gas

كمية الماء الموجودة في الغاز ترتبط برطوبة الغاز. الغاز الذي يكون مشبعاً تماماً ببخار الماء له رطوبة ١٠٠%. إذا كان فقط مشبع بنسبة ٥٠%، فإن رطوبته هي ٥٠%.

درجة حرارة الاشتعال: (Ignition Temperature)

هي أدنى درجة حرارة التي عندها يشتعل الوقود (يلتهب) في جو مؤكسد بدون أي مصدر لهب خارجي.

نقطة الوميض: (Flash Point)

نقطة الوميض هي أدنى درجة حرارة التي عندها ينتج بخار الوقود السائل شعلة

لهب لحظية عند التعرض إلى اللهب.

نقطة الحريق: (Fire Point)

نقطة الحريق (اللهب) هي أدنى درجة حرارة التي عندها ينتج بخار الوقود السائل لهب مستمر عند التعرض إلى لهب بدلا من اللهب اللحظي. نقطة الحرق أعلى من نقطة الوميض.

التكسير: (Cracking)

تكسير الجزيئات الكبيرة للوقود إلى جزيئات أصغر باستخدام الحرارة يسمى التكسير.

تحليل أورسات: (Orsat Analysis)

تعيين نسبة ثاني أكسيد الكربون، أول أكسيد الكربون، الأكسجين، النيتروجين في الغاز العادم باستخدام جهاز أورسات يسمى تحليل أورسات.

درجة حرارة اللهب النظرية:

درجة حرارة اللهب النظرية هي درجة الحرارة التي يتم الحصول عليها من ناتج احتراق الوقود عندما لا يكون هناك فقد في الحرارة إلى المجال المحيط. درجة حرارة اللهب العالي للوقود، تكون أفضل لأنها توفر كفاءة حرارية أعلى.

رقم الأوكتين: (Octane No.)

رقم الأوكتين هو معدل عدم حدوث الخبط (Antiknock Rating) للجازولين (وقود السيارات). وهو يساوي نسبة حجم مادة الأيزوأوكتين (Iso-Octane) في خليط من الأيزوأوكتين، إن-هيبتين (N-heptane) والذي يعطي نفس الخبط (knocking) مثل الجازولين تحت الاختبار عند الحرق في محرك اختبار قياسي. كلما زاد رقم الأوكتين كلما كان الجازولين أفضل.

رقم السيتين: (Cetane Number)

رقم السيتين يبين نوع الحرق ومعدل عدم الخبط لوقود الديزل. وهو النسبة

بالحجم للأوكثينين في خليط من الأوكثينين والألفا ميثيل نفتالين (Alpha-Methyl Naphthalene) والذي يعطي نفس تأخير الحرق مثل الديزل تحت الاختيار عند الحرق وهو المعيار القياسي لمحرك الديزل في الظروف القياسية. كلما زاد رقم الستين للديزل كان الديزل أفضل.

نقطة الصب: (Pour Point)

نقطة الصب هي أدنى درجة حرارة التي عندها زيت الوقود يتم صبه أو تدفقه عند التبريد تحت ظروف خاصة. في حالة زيادة التبريد للوقود أقل من نقطة الصب فإنه لا يتدفق ويحدث له تجمد. هاذ هام إذا كان الوقود السائل يتم تداوله في المناخ البارد أو عند ارتفاعات عالية.

٣- الوحدات الحرارية

(أ) السعر الحراري أو جرام سعر حراري:

Calorie (cal) Or gram calorie, gcal)

لكل الأغراض العملية، السعر الحراري أو الجرام الحراري يمكن تعريفه بكمية الحرارة اللازمة لرفع درجات الحرارة لجرام واحد من الماء درجة مئوية واحدة (١°) وتحديدًا من ١٥° م إلى ١٦° م.

$$١ \text{ سعر حراري} = ٤,١٨٥ \text{ جول} = ١٠ \times ١٠^{-٧} \text{ إرج}$$

(ب) الكيلو سعر حراري (الكيلو كالوري):

$$١ \text{ كيلو كالوري} (\text{كيلو سعر حراري}) = ١٠٠٠ \text{ سعر حراري}$$

(ج) الوحدة الحرارية البريطانية: (British Thermal Unit)

(BTU) هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة رطل من الماء درجة واحدة

فهرنهايت وتحديدًا من ٦٠° فهرنهايت إلى ٦١° فهرنهايت.

$$١ \text{ (BTU)} = ١,٠٥٤,٦ \text{ جول} = ١٠ \times ١,٠٥٤,٦ \times ١٠^{-٧} \text{ إرج}$$

التحويل للوحدات الحرارية المختلفة:

الوحدات الحرارية يمكن تحويلها على أساس ١ كيلوجرام = ٢,٢ رطل،

١ °م = ١,٨ ° فهرنهايت. وبذلك

١ كيلو كالوري (كيلو سعر حراري) = ١٠٠٠ سعر حراري =

= ٣,٩٦٨ وحدة حرارة بريطانية.

١ وحدة حرارة بريطانية = ٢٥٢ سعر حراري

١٠٠,٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية (BTU) = ١ ثيرم (I Therm)

= ١٠٥,٥ ميغا جول.

١ سعر حراري الجرام = كيلو سعر حراري / الكيلو جرام = ١,٨ وحدة حرارة بريطانية.

١ كيلو سعر حراري / م^٣ = ٠,١٠٧٧ وحدة حرارة بريطانية / قدم مكعب.

١ وحدة حرارة بريطانية / قدم مكعب = ٩,٣ كيلو سعر حراري / م^٣.

عند احتراق الوقود المحتوي على الهيدروجين، فإن الهيدروجين الموجود يحدث له احتراق ويتحول إلى بخار. عند تبريد نواتج الحريق إلى درجة حرارة الغرفة، فإن البخار يحدث له تكثف ويتحول إلى ماء عندئذ تنطلق الحرارة الكامنة (Latent Heat). لذلك فإن الحرارة الكامنة لتكثف البخار التي تنطلق تكون ضمن القيمة الحرارية الكلية.

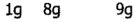
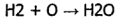
تعيين القيمة الحرارية بواسطة قنبلة القياس الحراري (Bomb Calorimeter) يعطي القيمة الحرارية الكلية أو العليا.

القيمة الحرارية الصافية أو القيمة الحرارية المنخفضة هي صافي الحرارة الناتجة عند الحرق الكامل لوحدة الوقود ثم السماح لنواتج الحريق بالصرف. لذلك

القيمة الحرارية الصافية أو المنخفضة = القيمة الحرارية الكلية - حرارة التكثيف الكامنة لبخار الماء المنتج.

= القيمة الحرارية الكلية - (كتلة الهيدروجين لوحدة الوزن من الوقود المحترق $\times 9$ الحرارة الكامنة لتبخير الماء).

واحد جزء بالوزن من الهيدروجين يعطي 9 أجزاء بالوزن من الماء كالاتي:



الحرارة الكامنة للبخار هي ٥٨٧ سعر حراري (أو كيلو كالوري/ الكيلو جرام أو ١٠٦٠ وحدة حرارية بريطانية/ الرطل من البخار المنتج).

الطاقة الحرارية الصافية (Net. C.v.) = الطاقة الحرارية الكلية (Gross c.v.) -

$$٥٨٧ \times H \times ٠,٠٩ = \text{الطاقة الحرارية الكلية} - ١٠٠/H \times ٩$$

حيث H = النسبة المئوية للهيدروجين في الوقود.

الطاقة الحرارية عند الضغط الثابت:

الطاقة الحرارية عند الضغط الثابت $Q_{c.p.}$ يمكن حسابها على أساس المعادلة التالية:

$$Q_{c.p.} = Q_{c.v.} - (\Delta n).R.T.$$

حيث:

$Q_{c.v.}$ = القيمة الحرارية عند ثبات الحجم (الذي يتم تعيينه بقنبلة القياس

الحراري)

A_n = الزيادة في الجزيئات الغازية بعد التفاعل.

R = ثابت الغاز Gas constant

T = درجة الحرارة المطلقة.

إذا كان هناك خفض في عدد الجزيئات الغازية المتكونة بعد التفاعل، عندئذ A_n سوف

يكون لها قيمة سالبة وبالتالي $Q_{c.p.}$ ستكون أعلى من $Q_{c.v.}$.

كثافة الطاقة الحرارية ودرجة حرارة اللهب :

(Calorific Intensity and Flame Temp)

عند احتراق الوقود بدون لهب يمكن تقديره أو إدراكه، فإن كل الحرارة الناتجة عن الحرق تكون مركزة في مساحة صغيرة نسبياً. في هذه الظروف، فإن الوقود الصلب الذي يحترق بسرعة ينتج عنه درجة حرارة عالية في شكل طبقة محلية. عندئذ يقال أن الوقود يحترق بطاقة حرارية ذات كثافة عالية.

أثناء حرق الوقود (الصلب، السائل أو الغاز) المحتوي على كميات غير مقدره من المواد المتطايرة فإن اللهب ينتج غالباً بشكل ثابت. عندئذ فإن كل الحرارة المنتجة بواسطة الوقود يتم انطلاقها على كل مساحة حرق الكتلة وزيادة مساحة اللهب يقابلها تركيز أقل للحرارة. لذلك، يمكن القول أن الوقود المحترق مع وجود لهب (Flaming) يحترق بكثافة طاقة حرارية أقل عن الوقود الذي يحترق بدون لهب (Flameless).

درجة حرارة اللهب تمثل أقصى درجة حرارة التي يمكن أن يصل إليها تسخين الغرض بواسطة اللهب. زيادة على ذلك، فإن معدل التسخين للغرض يزداد بزيادة الفرق في درجة الحرارة بين اللهب والغرض. درجة حرارة اللهب تعتمد أساساً على القيمة الحرارية للغاز وكميات إجمالي المنتجات الغازية المتكونة والحرارة النوعية لكل منها. ولكن، درجة حرارة اللهب التي حسبت بمفردها من الاعتبارات السابقة تكون أعلى بشكل ثابت للأسباب التالية:

١. الحرق لا يتم تماماً وفوراً.
٢. بعض الحرارة المنتجة تفقد في الوسط المحيط بالإشعاع.
٣. بعض الحرارة يفقد كطاقة حرارية كامنة لازمة للبخار المنتج.
٤. قليل من الحرارة يمكن امتصاصه بتحلل جزئيات الغاز.
٥. الحرارة النوعية للغازات تزداد مع درجة الحرارة والبيان المتعلق بالحرارات النوعية عند درجات الحرارة العالية يكون غير متاح تماماً.

ولكن، درجات حرارة اللهب الحقيقية لمختلف وقود الغازات سيكون بنفس القدر لدرجات حرارة اللهب لهذا والغازات بالتالي ولذلك يمكن استخدامها لمقارنة مختلف الوقود. درجة حرارة اللهب النظرية يمكن حسابها بالمعادلة التالية:

$$\text{درجة حرارة اللهب النظرية} = \frac{(\text{درجة حرارة الاحتراق} + \text{الحرارة المحسوسة في الوقود والهواء})}{(\text{كمية نواتج الحريق}) \times (\text{متوسط حرارتهم النوعية})}$$

المرونة و التحكم: (Flexibility and control)

رغم أن القيمة الحرارية هي العامل الرئيسي في تعيين أثمان الوقود، إلا أن بعض العوامل الأخرى يجب أن تؤخذ في الاعتبار كذلك. الوقود الذي يسهل حرقه، الذي يمكن حرقه بمعدلات مختلفة بحيث يكون تولد الحرارة بطيء أو سريع طبقا للمطلوب، والذي يمكن تداوله والتحكم فيه بسهولة أو تجميعه (في المحرك مثلا)، والذي يكون له مرونة أكبر يثبت أنه أفضل من الوقود الذي له قيمة حرارية عالية ولكن مرونته أقل. المرونة يمكن اعتبارها الاستجابة لانطلاق الحرارة مع التغير في ظروف العمل مثل الوقود أو الإمداد بالهواء.

٤- تعيين القيمة الحرارية للوقود الصلب والوقود السائل الغير متطايرة:

شكل (١/١)

قنبلة مقياس الحرارة أ، المسعر التفجيري (Bomb Caloremeter)

القيمة الحرارية للوقود الصلب أو الوقود السائل الغير متطاير يمكن تعيينها باستخدام المسعر التفجيري بالضغط العالي للأكسجين شكل (١ /) والذي يتكون من :

١. قنبلة اسطوانية قوية مصنوعة من صلب الأوستينيت المثبت المقارم للتآكل

والتي تكون قادرة على تحمل ضغط لا يقل عن ٥٠ جوي.

يتم تجهيز القنبلة بغطاء لولبي محكم ضد تسرب الغاز ومثبت به أقطاب من الصلب المقاوم ومحبس تصريف. أحد هذه الأقطاب أنبوبي والذي يعمل في نفس الوقت كمدخل للأكسجين. ملتصق بهذا القطب حلقة صغيرة تعمل كحامل للبوقة.

٢. وعاء نحاسي للقياس الحراري الذي تركز عليه القنبلة أثناء الاختبار.
٣. غلاف خارجي مقفل لحجز الماء.
٤. خلاط لتقليب الماء في جهاز قياس الحرارة بمعدل ثابت.
٥. ترمومتر مدرج بترقيم جزء من ١٠٠ درجة مئوية. المستخدم عادة هو الترمومترات ثابتة الصفر أو الترمومترات من نوع (Beckman).
٦. مهمات أخرى ضرورية لضغط الفحم إلى حبيبات، وملئ القنبلة بالأكسجين...الخ.

الطريقة:

١. حوالي $\frac{1}{2}$ إلى ١ جرام من الفحم المطحون الناعم الذي تم تجفيفه في الهواء (يفضل المضغوط في شكل حبيبات) يتم وزنه بدقة في بوتقة جهاز قياس السعر الحراري. (Calorimeter)
٢. قطعة من سلك البلاتين الدقيق (سمك ٠,٠٠٧٥ سم) يتم شدها عبر قطع القطب للقنبلة ثم يتم ربط أحد نهايات خيط القطن (المستخدم في الحياكة) حول السلك. يتم وضع البوتقة في مكانها وينظم الطرف الآخر للخيط بحيث يكون ملتصقا بالفحم. وبالتبادل، يستخدم سلك أطول من البلاتين، ثم يتم تثبيته بحيث يمكن أن يلمس حبيبة الفحم.
٣. يتم إدخال حوالي ١٠ سم^٣ من الماء المقطر في القنبلة لامتصاص أبخرة أحماض الكبريتيك والنيتريك المتكونة أثناء الحرق ثم يتم قفل غطاء القنبلة.
٤. يتم ملء القنبلة بالأكسجين حتى ضغط ٢٥ جوي وأسلاك الحرق يتم ربطها عند الأطراف.
٥. يتم وزن وعاء مقياس السعر الحراري، يتم وزن الماء الكافي بما يكفي لغمر غطاء القنبلة.
- يتم عندئذ وضع وعاء مقياس السعر الحراري في الغلاف الخارجي على قدمة عازلة مجهزة. يتم خفض القنبلة في مقياس السعر الحراري (Calorimeter). يتم وضع

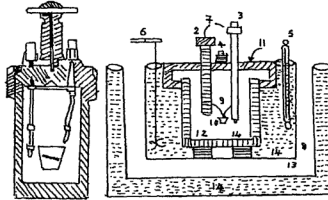
الخلاط وغطاء وعاء مقياس السعر الحراري في مكانهم وضبط ترمتر "بكمان".

٦. يبدأ تشغيل الخلاط.

٧. بعد خمسة دقائق يتم ملاحظة درجة حرارة الماء إلى أقرب 0.002°C وأخذ خمسة قراءات أخرى كل بفواصل دقيقة واحدة.

٨. عند نهاية الدقيقة الخامسة، يتم توصيل الأقطاب ببطارية ٦ - ١٢ فولت لحرق الشحنة مع استمرار القراءات بعد كل دقيقة. بعد الوصول إلى أقصى درجة حرارة ، تستمر القراءات حتى ينتظم معدل الهبوط.

٩. يتم إيقاف الخلاط وسحب القنبلة من مقياس السعر الحراري. بعد فترة حوالي نصف ساعة لترسيب ضباب الحامض خلال القنبلة، فإن مكونات القنبلة يتم غسلها في كأس وكمية حامض H_2SO_4 ، HNO_3 في هذا المحلول يتم تعيينها.



شكل (١) مقطع للقنبلة

- | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------|-------------|
| (١) قنبلة أسطوانية قوية | (٢) قطعتين الصلب المقاوم | (٣) قطب من أنبوب | (٤) محبس تحرق | (٥) ترمومتر |
| (٦) خلاط كهربى | (٧) أطراف الأشعال | (٨) مقياس السعر الحراري | (٩) سلك انصهار | |
| (١٠) بوسقة | (١١) غطاء مقلوط | (١٢) حبيبات الوقود | (١٣) غلاف هوائى | (١٤) ماء |

الحسابات:

وزن عينة الوقود = m جرامات

أعلى أو القيمة الحرارية الكلية للوقود = θ سعر حراري/ الجرام.

وزن الماء الذي أخذ في مقياس السعر الحراري = ٧٧ جرام
مكافئ الماء لمقياس السعر الحراري، القنبلة، الترمومتر، الخلاط.... الخ = ω جرام

درجة الحرارة الأولية = t_1 °م

درجة الحرارة النهائية = t_2 °م

الحرارة المنطلقة بحرق الوقود = $m \theta$

الحرارة الممتصة بالماء، مقياس السعر الحراري..... الخ = $(\omega + w)(t_2 - t_1)$

الحرارة المنطلقة = الحرارة الممتصة

$$m \theta = (w + \omega)(t_2 - t_1)$$

$$\frac{(w + \omega)(t_2 - t_1)}{m} = \theta \text{ القيمة الحرارية الكلية}$$

ولكن لزيادة دقة النتائج، فإنه يلزم عمل التصحيحات الآتية في المعادلة السابقة:

(١) تصحيح الحامض t_A ، تصحيح سلك الانصهار t_F ، تصحيح خيط القطن t_C ، تصحيح التبريد t_C . ولذلك فإن المعادلة السابقة يتم تعديلها كالآتي:

$$\theta = \frac{(w + \omega)(t_2 - t_1 + t_C) - (t_A + t_F + t_T)}{m} \text{ القيمة الحرارية الكلية}$$

حساب القيمة الحرارية الصافية: (Calculation of the Net Calorific Value)

القيمة الحرارية الصافية (Net.c.v.) = القيمة الحرارية الكلية (Gross.c.v.) - الحرارة المختزنة في بخار الماء المتكون أثناء حرق (m) جرامات من الوقود =

$$= \text{القيمة الحرارية الكلية} - 0.9 \times 8 \times 8 \times 8$$

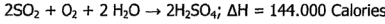
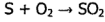
حيث (H) هي نسبة الهيدروجين الموجود في الوقود والحرارة الكامنة للبخار هي ٨٧٠ سعر حراري/ الجرام.

التصحيحات: (Corrections)

(١) تصحيح الحامض (t_A) :

الكبريت الموجود في الفحم يتحول إلى H_2SO_4 في القنبلة طبقاً للمعادلات التالية:

1



(49 X 4)

(الوزن المكافئ $(H_2SO_4) = 49$)

بالمثل النيتروجين الموجود في الفحم وجزء من ذلك في الهواء في القنبلة يتحول إلى (HNO_3) .



(الوزن المكافئ لـ $HNO_3 = 63$)

حيث أن كلا التفاعلين السابقين هما من التفاعلات المنتجة للحرارة (Exothermic)، وحيث أن الحرارة المتولدة لا يتم الحصول عليها في الاستخدام العادي للفحم، لأن SO_2 و NO_2 يمر كلاهما إلى الجو فإن اللصقي يجب عمله للحرارة المتولدة في القنبلة بتكوين H_2SO_4 ، HNO_3 كالآتي:

(أ) ٣,٦ سعر حراري يتم طرحها لكل سم^٣ من ٠,١ عياري حامض الكبريتيك المتكون $(N/10, H_2SO_4)$.

(ب) ١,٤٣ سعر حراري يتم استقطاعها لكل سم^٣ من ٠,١ عياري حام النيتريك المتكون $(N/10 HNO_3)$ المتكون

"طبقاً للمعادلات المعطاة سابقاً"

(٢) تصحيح سلك الصهر (t_f) (Fuse wire correction)

يتم عمل التصحيح لكمية الحرارة بالسعر الحراري المكافئة الناتجة عن صهر وحرق السلك طبقاً لبيانات المنتج.

(٣) تصحيح خيط القطن: (cotton thread correction)

التصحيح لخيط القطن المستخدم في إشعال الشحنة يتم حسابه من وزن خيط القطن الجاف المستخدم على أساس أن القيمة الحرارية للسليولوز هي ٤١٤٠ سعر حراري للجرام.

(٤) تصحيح التبريد: (cooling correction)

إذا كان الوزن اللازم لتبريد الماء في مقياس السعر الحراري من أقصى درجة حرارة تم الوصول إليها إلى درجة حرارة الغرفة هو (x دقيقة) وأن معدل التبريد هو (dt / الدقيقة)، عندئذ يكون تصحيح التبريد dt_{xx} .
وهذا يتم إضافته إلى الزيادة الملاحظة في درجة الحرارة.

تعيين مكافئ الماء للجهاز: (Determination of the water equivalent)

أفضل تعيين لمكافئ الماء للجهاز يتم بحرق وزن معين (يفضل حوالي ١,٢ جرام) من حامض البنزويك. (benzoic acid) (في شكل أقراص) في القنبلة في ظروف مشابهة كما تم توضيحه. يتم ملاحظة الارتفاع في درجة الحرارة. يتم أخذ القيمة الحرارية القياسية لحامض البنزويك على أساس ٦٣٢٤ سعر حراري للجرام. حيث أن كل القيم الأخرى في المعادلة تكون معلومة، فإن مكافئ الماء للجهاز يمكن حسابه.
المواد الأخرى المناسبة كمعيار قياسي هي:

المادة	السعر الحراري
نفتالين	٩٦٢٢ سعر حراري/ الجرام
حامض الساليسيك	٥٢٦٩ سعر حراري/ الجرام
الكافور (Camphor)	٩٢٩٢ سعر حراري/ الجرام

مثال (١)

عين مكافئ الماء لجهاز قنبلة مقياس السعر الحراري والذي أعطى البيانات الآتية في التجربة:

وزن حامض البنزويك الذي أخذ = ١,٣٤٦ جرام
وزن عليه مقياس السعر الحراري = ١٠٢٥ جرام
وزن عليه مقياس السعر الحراري + الماء = ٣٠٢٥ جرام

درجة الحرارة الأولية = $11,872^{\circ}\text{م}$

درجة الحرارة النهائية = $14,625^{\circ}\text{م}$

تصحيح التبريد = $0,015^{\circ}\text{م}$

- الحرارة من المصهرات (Fuses) = 22 سعر حراري

غسيل القنبلة عند التحليل أظهر وجود $3,5$ سم³ من $(\text{N}/10 \text{ HNO}_3)$ ولم يكن هناك H_2SO_4 متكون.

الحل:

وزن حامض البنزويك المأخوذ = $1,346$ جرام

وزن الماء المأخوذ في علبة مقياس السعر الحراري = $(3,025 \text{ جرام} - 1,025 \text{ جرام})$

= $2,000$ جرام.

تصحيح الارتفاع في درجة الحرارة = $(11,872 - 14,625) + 0,015 =$

$2,753 + 0,015 = 2,768^{\circ}\text{م}$

الحرارة الناتجة بسبب حامض البنزويك =

$(\text{وزن حامض البنزويك} \times \text{القيمة الحرارية}) = 1,346 \times 6324$

= 8626 سعر حراري

الحرارة من المصهرات (Fuses) = 22 سعر حراري

الحرارة من $\text{HNO}_3 = 3,5 \times 1,43 = 5$ سعر حراري

إجمالي الحرارة التي أعطيت لمقياس السعر الحراري =

$(1) + (2) + (3) = 8626 + 22 + 5$ سعر حراري

= 8653 سعر حراري.

الحرارة المعطاة لمقياس قياس السعر الحراري

إجمالي مكافئ الماء = تصحيح الارتفاع في درجة الحرارة

$$3126 \text{ جرام} = \frac{8653}{2,768}$$

الماء الذي أخذ في مقياس السعر الحراري = 2000 جرام
مكافئ الماء لمقياس السعر الحراري والإضافات.

$$= (2000 - 3126) \text{ جرام} = 1126 \text{ جرام}$$

مثال (٢):

يتم الحصول على البيانات التالية من تجربة قنبلة مقياس السعر الحراري:

وزن البوتقة = 3,649 جرام

وزن البوتقة + الوقود = 4,678 جرام

مكافئ الماء لمقياس السعر الحراري = 570 جرام

الماء المأخوذ في مقياس السعر الحراري = 2200 جرام

الارتفاع الملاحظ في درجة الحرارة = 2,3 °م

تصحیح التبريد = 0,047 °م

تصحیح الأحماض = 62,6 درجات حرارية

تصحیح سلك الصهر = 3,8 درجات حرارية

تصحیح خيط القطن = 1,6 درجات حرارية

لحسب القيمة الحرارية الكلية لعينة الوقود. إذا كان الوقود يحتوي على 6,5 % هيدروجين، عين القيمة الحرارية الصافية.

الحل:

$$\text{High.c.v.} = \frac{(w + \omega) (t_2 - t_1 + t_C) - (t_A + t_F + t_T)}{M} = \text{القيمة الحرارية العالية}$$

$$= \frac{(2200 + 570) (2.3 + 0.047) - (62.6 + 3.8 + 1.6)}{(4.678) - (3.649)}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{68 - (2770 \times 2.347)}{1.029} \\
 &= \frac{68 - 6510}{1.029}
 \end{aligned}$$

= ٦٢٦١ سعرات حرارية

القيمة الحرارية المنخفضة / سعر الجرام = $(H.C.V - 0.09 \times H \times 587)$ Low.C.V

$$= ١٦٢٦ - ٠,٠٩ \times ٦,٥ \times ٥٨٧$$

$$= ٣٤٣,٤ - ٦٢٦١ = ٥٩١٧,٦ \text{ سعر حراري / الجرام}$$

٥- تعيين القيمة الحرارية لوقود السوائل المتطايرة والغازات: شكل (١/٢)

Determination of Calorific Value of Gases and Volatile Liquid Fuels:

القيمة الحرارية للوقود الغازي والسائل المتطاير يتم تعيينها باستخدام جهاز

قياس السعر الحراري للغاز لبويز (Boy's Gas Calorimeter)

مخطط لشكل الجهاز المستخدم موضح في الشكل (٢/). وهذا الجهاز يتكون من

الأجزاء الآتية:

١. موقد الغاز (Gas Burner) حيث يحرق فيه حجم معين من الغاز عند ضغط

معين بمعدل منتظم. يتم قياس حجم الغاز بواسطة مقياس مثبت قرب مدخل الغاز.

٢. يحاط الموقد بمدخنة أو غرفة حرق التي لها مواسير نحاس في كل من الداخل

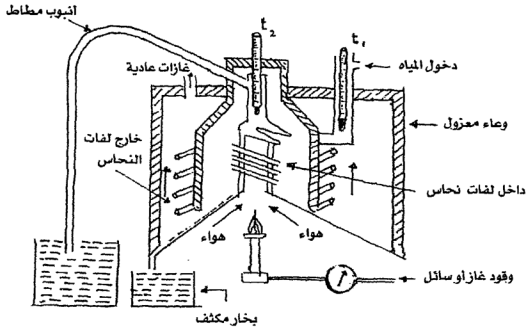
والخارج. خلال لفة مواسير النحاس، يسيل الماء بمعدل ثابت. يدخل الماء من

أعلى اللفة الخارجية لمواسير النحاس ثم يمر خلال اللفة الخارجية ويتحرك

إلى قاع المدخنة ثم عندئذ يتحرك إلى أعلى خلال داخل لفة مواسير النحاس

ويخرج من أعلى.

٣. الترمومتر (t_1) و (t_2) مثبتين لملاحظة درجة حرارة دخول وخروج الماء على التوالي.
٤. يتم توفير وعاء لجمع الماء الذي يتكون بسبب التكثف للبخار الناتج أثناء الحرق.
٥. كل التجهيز يكون مغلقا ومحاطا في غرفة عازلة.



شكل (٢) مقياس الطاقة الحرارية بطريقة (Boy)

العمل: (Working)

يستمر حرق الوقود وتدفير المياه لمدة حوالي ١٥ دقيقة لفترة التدفئة الأولية. عندما تحدث سخونة لمقياس السعر الحراري يتم ضبط معدل اللهب بحيث يترك الماء الجهاز قريبا من الضغط الجوي. الحرارة الناتجة عن حرق الوقود الغازي تنقل إلى الماء في لفة المواسير النحاسية وبخار الماء المتكون داخل المدخنة أثناء الحرق يتكثف إلى الماء الذي يتجمع. تلاحظ القراءات التالية، وذلك عند ثبات الظروف:

١. حجم الغاز المحترق عند درجة حرارة وضغط معين في زمن (t)، هذا الحجم

عندئذ يتم تحويله إلى درجة الحرارة والضغط القياسي (STP).

٢. وزن الماء المار خلال الملف في الزمن (t).

٣. درجة حرارة الفاء الداخل والماء الخارج.

٤. وزن الماء المكثف أثناء هذا الوقت.

الحسابات: لنفرض أن

$$Vm^3 = \text{حجم الغاز المحروق عند درجة الحرارة والضغط}$$

القياسي في زمن معين (t)

$$WKg = \text{وزن الماء المار خلال الملف النحاسي في زمن (t)}$$

$$m = \text{وزن الماء المكثف خلال هذا الوقت.}$$

$$T_1 = \text{درجة حرارة الماء الداخل.}$$

$$T_2 = \text{درجة حرارة الماء الخارج.}$$

$$T_1 - T_2 = \text{الارتفاع في درجة الحرارة.}$$

$$C = \text{القيمة الحرارية الكلية.}$$

$$W(T_2 - T_1) = \text{الحرارة الممتصة بواسطة دوران الماء.}$$

$$VC = \text{الحرارة الناتجة عن حرق الوقود.}$$

$$W(T_2 - T_1)$$

$$= (G.C.V) \text{ القيمة الحرارية الكلية}$$

$$V$$

القيمة الحرارية الصافية: (Net Calorific Value)

وزن الماء المكثف لكل متر مكعب من الغاز = v/m كجرام

$$587 \times m$$

$$\text{الحرارة الكامنة للبخار لكل متر مكعب من الغاز} = \text{كيلو سعر حراري}$$

$$\left[\frac{587 \times m}{V} - \text{القيمة الحرارية الكلية} \right] = \text{القيمة الحرارية الصافية} \quad \text{حراري/م}^3$$

الحساب النظري للقيمة الحرارية للوقود:

نظريا يمكن حساب القيمة الحرارية للوقود في حالة معرفة النسبة المئوية للعناصر المكونة للوقود. طبقا لديلونج (Dulong)، فإن القيمة الحرارية للوقود هي مجموع القيم الحرارية لمكوناته.

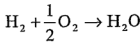
القيمة الحرارية للكربون والهيدروجين والكبريت وجد أنها

$$(H = 808) ، (C = 34500) ، (S = 22400) \text{ كيلو جرام/ السعر الحراري.}$$

في حالة وجود الأكسجين كذلك، فإنه يتحد مع الهيدروجين ليكون الماء. لذلك فإن الهيدروجين في الشكل المتحد لا يكون متاحا للحرق ويسمى الهيدروجين المثبت. كمية الهيدروجين المتاحة للحرق =

$$= \text{الكتلة الكلية للهيدروجين} - \text{الهيدروجين المتحد مع الأكسجين}$$

ولذلك نرى أن ، ٨ أجزاء بالوزن من الأكسجين تتحد مع جزء واحد بالوزن من الهيدروجين لتكوين الماء أي أنه لكل ٨ أجزاء من الأكسجين يحدث تثبيت لجزء واحد من الهيدروجين.



$$2 \quad 16 \quad 18$$

الوزن الجزيئي

$$9 \text{ جرام} \quad 8 \text{ جرام} \quad 1 \text{ جرام}$$

يعادل

إذن كمية الأكسجين المتاحة للحرق =

$$= \text{إجمالي كتلة الهيدروجين} - \frac{8}{1} \text{ كتلة الأكسجين في الوقود}$$

$$= \frac{O}{8} - H$$

معادلة ديولونج (Dulong) لحساب القيمة الحرارية كالأتي:

القيمة الحرارية الكلية (Gross.C.V)

$$= 100/1 [8000 + C + 34500 (H - \frac{O}{8}) + 2240 S] \text{ كيلو سعر حراري/الكيلو}$$

جرام

حيث C ، H ، O ، S هي النسب المئوية للكربون، الهيدروجين، الأكسجين والكبريت على التوالي.

القيمة الحرارية الصافية: (NC.V) (Net Calorific Value):

$$= \text{القيمة الحرارية الكلية G.C.V} - 900/1 [H \times 587] \text{ كيلو سعر حراري/}$$

الكيلو جرام

$$= \text{القيمة الحرارية الكلية} - H \times 900 [587 \times 0.9] \text{ كيلو سعر حراري/الكيلو}$$

جرام

مثال:

أثناء تعيين القيمة الحرارية للوقود الغازي باستخدام مقياس السعر الحراري لبويل. تم تسجيل النتائج التالية:

حجم الوقود الغازي المحترق عند درجة الحرارة والضغط العادي = ٠,٠٩٨ م^٣
وزن الماء المستخدم كالأتي:

تبريد نواتج الحريق = ٥٠ كيلوجرام.

وزن البخار المكثف = ٠,٠٥١ كيلوجرام

درجة حرارة الماء الداخل = ٢٦,١ °م

درجة حرارة الماء الخارج = ٤٦,٥ °م

عين القيمة الحرارية الكلية والقيمة الحرارية الصافية للوقود.

$$\frac{W (T_2 - T_1)}{V} = \text{القيمة الحرارية الكلية (G.C.V)}$$

$$= \frac{50 \times (26,1 - 46,5)}{0,098} = 10408,2 \text{ كيلو سعر حراري/ م}^3$$

القيمة الحرارية الصافية (M.C.V) = القيمة الحرارية الكلية - $\frac{m}{v} \times$ الحرارة الكامنة لتكثيف البخار

$$= 10408,2 - 0,051 \times \frac{0,051}{0,098} = 10102,7 \text{ كيلو سعر حراري/ م}^3$$

٦- خواص الوقود الجيد:

عند اختيار الوقود لغرض معين، فإنه يجب مراعاة العوامل الآتية:

١. مناسبة الاستخدام: الوقود الذي يتم اختياره يجب أن يناسب الغرض المستخدم، فمثلاً الكوك المنتج من الفحم الليتومي هو المناسب للفرن العالي.

٢. القدرة الحرارية العالية: يجب أن يكون الوقود له قدرة حرارية عالية لأن القدرة الحرارية هي التي تحدد كفاءة الوقود. كلما زادت كمية الحرارة لوحدة الكتلة أو الحجم، كلما كان الوقود أفضل.

٣. درجة حرارة الاشتعال: (Ignition Temp) درجة حرارة الاشتعال هي أقل درجة حرارة يجب أن يتم تسخين الوقود إليها بما يمكن من الحرق الهادئ. الوقود الجيد يجب أن تكون له درجة حرارة اشتعال متوسطة. إذا كان الوقود له درجة حرارة اشتعال منخفضة فإن عملية التخزين والنقل تصبح خطيرة، حيث يمكن أن تحدث مخاطر الحريق. وإذا كانت درجة حرارة الاشتعال مرتفعة يصبح التخزين والنقل أسهل ولكنه يسبب صعوبة في الاشتعال.

٤. المحتوى من الرطوبة: المحتوى من الرطوبة يجب أن يكون منخفضاً لأن وجود رطوبة عالية يقلل القيمة الحرارية للوقود.

٥. المحتوى من المواد الغير قابلة للاشتعال: المواد الغير قابلة للاشتعال تكون خبث (Clinker) بعد الحرق، ووجودها يقلل القيمة الحرارية وكذلك يضيف

تكاليف التخلص بعد الحرق.

٦. سرعة الاحتراق: سرعة الاحتراق يجب أن تكون معتدلة. السرعة العالية جدا للاحتراق غير مطلوبة، بينما السرعة المنخفضة جدا تسبب فقد في الحرارة بسبب الإشعاع.

٧. طبيعة المنتجات: المنتجات المتكونة يجب ألا تكون ضارة. المنتجات الغازية المنبعثة أثناء الحرق يجب أن تكون غير مسببة للروائح الكريهة أو أي تأثيرات ضارة أخرى.

٨. سعر الوقود: يجب أن يكون الوقود له سعر منخفض ومناسب وأن يكون متاحا بكميات كبيرة.

٩. الدخان: الدخان المنبعث يجب أن يكون أقل ما يمكن.

١٠. التحكم في العملية: يجب أن يكون الوقود بحيث أنه يمكن التحكم في حرقه أي أنه يمكن بسهولة بدايته أو إيقافه.

مقارنة بين الوقود الصلب، السائل، الغاز بالنسبة للخواص السابقة موضح في الجدول التالي.

جدول : المميزات النسبية للأشكال الطبيعية الثلاث للوقود

الوقود الصلب	الوقود السائل	الوقود الغازي
رخيص نسبيا ومتاح بسهولة	أعلى سعرا عن الوقود الصلب ولكنه رخيص في دول المصدر	باستثناء الغاز الطبيعي الوقود الغازي ينتج من الوقود الصلب أو السائل وبذلك يكون مكلف
التخزين، النقل، التداول يشكل صعوبة إلى حد ما	يسهل نقله. يجب الحرس عند التخزين في وعاء مغلق	يجب تخزينه في أوعية مائعة للتسرب وبحاج إلى مساحة كبيرة للتخزين يمكن توزيعه خلال خطوط مواسير
يصنع قريبا من موقع الفحم	الأوعية، مساحات التخزين أقل الإعداد يتم إما خلال مواسير	

الوقود الصلب	الوقود السائل	الوقود الغازي
	مقارنة بالوقود الصلب والغازي	أو بالتسييل والحفظ تحت ضغط في اسطوانات حديدية اسطوانات (LPG)
الحرق عملية بطيئة وبمجرد بدايته يجب استمراره بالهواء. التحكم وتوقف الحرق ليس سهلا	الحرق يحدث سريعا، عملية الحرق يمكن التحكم فيها أو إيقافها عند الحاجة إلى ذلك.	أكثر سرعة في الإذابة مع الهواء مقارنة بالسوائل ويحدث الحرق سريعا ويكفاءة أعلى. الهواء المطلوب قليلا مقارنة بالوقود السائل أو الوقود الصلب. يمكن استمرار الجو المؤكسد أو المختزل المتعادل بالتحكم في الامداد بالهواء ولذلك فإنه تتاح مرونة أكبر في الاستخدام
بشكل ثابت ينتج بعض من الرماد حيث يشكل التخلص منه بعض المشاكل	الحرق نظيف وغير منتج للرماد ولكن الوقود حيث المحتوى العالي من الكربون والمواد الأروماتيكية يمكن أن تنتج دخان	لا إنتاج للرماد أو للدخان
يلزم عمالة لتشوين الفحم. لا يستخدم في محركات الاحتراق الداخلي. له كفاءة حرارية منخفضة	الحاجة إلى العمالة أقل. يستخدم في محركات الاحتراق الداخلي. كفاءته الحرارية أعلى من الوقود الصلب	يستخدم في محركات الاحتراق الداخلي. كفاءته الحرارية هي الأعلى.

الفصل الثاني

2

الوقود الصلب

الوقود الصلب الموجود طبيعياً (الوقود الأولي) وكذلك الذي يتم تصنيعه وتجهيزه (الثانوي) يستخدم كثيراً في الأغراض المنزلية والصناعية. الخشب والأنواع المختلفة من الفحم يشكل الوقود الصلب الأولي الهام. الفحم النباتي أو الحيواني (Charcoal) أو الكوك... الخ يمثلوا الوقود الثانوي المنتج من الأنواع الطبيعية.

الخشب :

استخدم الخشب كوقود منذ زمن بعيد. ولكن، بسبب الإزالة الكبيرة التي حدثت في الغابات فإن الخشب لم يعد يستخدم عدا في مناطق الغابات حيث تكون أسعاره منخفضة جداً.

الخشب الذي تم قطعه حديثاً يحتوي على ٢٥ - ٥٠% رطوبة. طبيعي أن استخدامه يتم في الحالة الجافة حيث يكون محتواه من الرطوبة من ١٠ إلى ١٥%. القيمة الحرارية للخشب تتناسب مع محتواه من الماء. الجزء القابل للاحتراق من الخشب غالباً يكون من السيليلولوز واللجنين المحتوي على آثار قليلة من الرماد المعدني. كذلك توجد الراتنجات والمواد الشمعية.

القيمة الحرارية للخشب الذي تم تجفيفه في الهواء هي حوالي ٣٥٠٠ إلى ٤٥٠٠ كيلو سعر حراري لكل كيلو جرام. وهو يحترق بلهب طويل وغير منتج

للدخان، تاركا كمية قليلة من الرماد. رغم أن المحتوى من المواد قليلا إلا أن المحتوى من الأكسجين مرتفعا جدا. وهذا يجعل حتى الخشب الجاف له قيمة حرارية منخفضة. ولكن ما تزال خاصية انخفاض درجة حرارة اشتعال، اللهب الغير منتج للدخان وعدم وجود مشاكل مصاحبة للتخلص من الرماد هي النقط البارزة لمميزات الخشب. الخشب يستخدم كثيرا كوقود منزلي.

الفحم النباتي يتم إنتاجه بالتقطير الإتلافي للخشب. الاستخدام الرئيسي للفحم النباتي (Charcoal) هو في إنتاج الفحم المنشط الذي يستخدم على نطاق واسع لإزالة اللون في صناعة السكر وتبييضه.

الفحم: (Coal):

الفحم يعتبر وجود حفر (Fossil) الناتج عن أنقاض في النبات التي تعرضت لظروف من درجات الحرارة المرتفعة والضغط المرتفع خلال ملايين السنين. من الناحية الكيميائية فإن الفحم مادة عضوية معقدة بها كميات مختلفة من المياه مع كميات من النيتروجين والكبريت. تحول أنقاض النبات إلى الفحم يحدث على مرحلتين:

١. المرحلة البيوكيميائية أو مرحلة فحم المستنقعات (Peat):

أثناء هذه المرحلة تم مهاجمة المادة النباتية بالعديد من الكائنات الحية الدقيقة. المنتج النهائي لهذه المرحلة هو فحم المستنقعات ويرمز له بالآتي:



٢. التحول الكيميائي أو التحويلي:

في هذه المرحلة فإن رواسب فحم المستنقعات المدفونة تحت الصخور الرسوبية تفقد الرطوبة والمكونات المتطايرة نتيجة تأثير درجة الحرارة العالية والضغط المرتفع. يصبح فحم المستنقعات غني بالكربون عند انخفاض محتواه من الأكسجين. فحم المستنقعات الإسفنجي يتحول إلى فحم صلب ذو قسافة (Brittle) بالتدريج. الوقت اللازم لتكوين الفحم البني الحديث (Young Brown) هو حوالي ١٠ سنوات بينما ذلك لمعظم الفحم الطبيعي هو ٣ X ١٠^٨ سنوات.

تقسيم الفحم:

ينقسم الفحم على أساس رتبته. والتي تعرف بأنها درجة التفحم من المادة الأصلية، الخشب. عند تحول الخشب إلى فحم تحدث زيادة تدريجية في تركيز الكربون وانخفاض في تركيز الأكسجين والنيتروجين. تعطي رتبة لأنواع الفحم طبقا للمحتوى من الكربون للفحم من الخشب إلى الفحم النباتي.

يمكن تقسيم الفحم إلى الرتب الآتية جدول (١)

نوع الفحم	نسبة (الجفاف على أساس الخلو من المواد المعنوية)				نسبة الرطوبة %	القيمة الحرارية
	C	H	O	N		
خشب ↓ فحم المستنقعات ↓ الفحم البني ↓ الفحم ↓ البيتوميني ↓ فحم الأثرائيت (النباتي)	٥٠-٤٠	٦-٥	٤٠-٢٠	٠,٥	٩٠-٧٠	٤٥٠٠-٤٠٠٠
	٦٠-٤٥	٦,٥-٣,٥	٤٥-٢٠	٣-٠,٧٥	٩٠-٧٠	٥٢٨٠-٤١٢٥
	٧٥-٦٠	٥,٥-٤,٥	٣٥-١٧	٢-٠,٧٥	٥٠-٣٠	٧٤٠٠-٦٦٠٠
	٩٠-٧٠	٥,٥-٤	٣٠-٢٠	٢-٠,٧٥	٢٠-١٠	٨٨٠٠-٦٦٠٠
	٩٥-٩٠	٤-٣	٣-٢	٢-٠,٥	٣,٥-١,٥	٨٨٠٠-٨٤٧٠

لهذا يتضح من الجدول أنه كلما زاد المحتوى من الكربون وزادت القيمة الحرارية للكربون مع زيادة درجة التفحم، فإنه تقل نسبة الهيدروجين والأكسجين والنيتروجين والمواد المتطايرة والرطوبة مع زيادة درجة التفحم.

١- فحم المستنقعات: (Peat)

فحم المستنقعات هي أول مراحل تكون الفحم من السيليلوز. وهو ليس فحم أو خشب ولكنه في مرحلة متوسطة بين الاثنين. وهو يتكون بالتحلل التدريجي للمادة

النباتية في الأماكن الرطبة. فحم المستنقعات له لون ما بين البني والأسود وبه كمية كبيرة من الماء. مكونات فحم المستنقعات ٨٥% رطوبة، ١٠٤ مواد متطايرة، ٤,٦% كربون مثبت. مكونات المادة العضوية الموجودة في فحم المستنقعات تتوقف على درجة التحلل. كلما زادت درجة التحلل كلما زاد المحتوى من الكربون.

الفحم الحجر ليس وقود اقتصادي بسبب نسبته المرتفعة من الرطوبة وقلة قيمته الحرارية. فحم المستنقعات الذي تم تجفيفه في الهواء له قيمة حرارية ٥٤٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام. يستخدم فحم المستنقعات كذلك كسماد وكمادة حشو بسبب قوامه اللين وطبيعته الإسفنجية.

يتم تجفيف الفحم الصخري في الهواء إلى نسبة رطوبة ٥٠% ثم غربلته (Screened). المسحوق الذي يتم الحصول عليه يتم تجفيفه في الهواء ثانياً إلى نسبة رطوبة حتى ١٠% ثم يتم تشكيل المادة في شكل قوالب في ماكينات الضغط. (عملية القوبلة هي تحويل الحبيبات إلى كتلة مدمجة بإضافة أو بدون إضافة مادة ربط. الكتلة المتكونة تسمى القالب)، وهذه القوالب تستخدم في بعض البلدان كوقود منزلي.

(٢) اللجنيت أو الفحم البني: (Lignite Or Brown Coal)

وهذا مرتبط بالمرحلة ما بين الفحم الصخري والفحم الأسود. وهو يعتبر فحم غير ناضج ويحتوي على نسبة عالية من الرطوبة في المجال من ٣٥ - ٦٠%. عند الجفاف في الهواء فإن الرطوبة تجف إلى حد ما. اللجنيت عند تعرضه للهواء يمتص الأكسجين بسرعة ويحترق في نفس الوقت. لذلك فإنه لا يتم تخزينه في مكان مفتوح. المحتوى من الكربون والأكسجين للجنيت الذي تم تجفيفه في الهواء هو حوالي ٧٠% و ٢٠% على التوالي. وهو يحترق مع ظهور لهب طويل ودخان وله قيمة حرارية حوالي ٥٨٠٠ - ٧٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام على أساس عدم الجفاف (Dry Free Basis).

للجنيت لا يعتبر وقود جيد ولكنه أفضل من فحم المستنقعات. وهو عموماً يتم تحويله إلى قوالب بعد إزالة الرطوبة ويستخدم كوقود منزلي. يستخدم اللجنيت في

إنتاج الغاز المنتج - غاز المولدات (Producer - Gas) . عند الكربنة (Carbonization) فإنه ينتج القار وكبريتات الأمونيا. كبريتات الأمونيا تستخدم كسماد.

(٣) الفحم البيتومي (الفحم العادي):

هذا الفحم هو الرتبة التجارية العادية للفحم. وهو له لون ما بين الرمادي الداكن إلى أسود القطران ويحترق بلهب أصفر به دخان. وله بريق ما بين اللامع والباهت. الفحم البيتومي له بناء طبقي من طبقات متطابقة ومتتالية لامعة وعائمة أو باهتة. القيمة الحرارية للفحم البيتومي مرتفعة إلى حد ما، حوالي ٧٠٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام إلى ٨٠٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام. وبه تركيز جيد من الكربون المثبت في مكوناته. الفحم البيتومي العادي ينقسم طبقا لمحتواه من الكربون إلى الآتي:

الشبيه بالفحم البيتومي (Sub-bituminous Coals):

وهو فحم أسود قائم ويصعب تمييزه على الفحم البيتومي العادي. الفحم الشبيه بالفحم البيتومي هو برتبة أدنى من الفحم البيتومي ويبدو أنه شريطي (Banded) مثل الفحم البيتومي. هذه الشرائط أو الطبقات ذات التصاق ضعيف حيث يمكن أن تنفصل بسهولة إلى شرائح بدلا من أن تنكسر إلى كتل مستطيلة. مثل اللجنيت فإن الفحم الشبيه بالفحم البيتومي يفتت عند تعرضه للجو. لذلك فإنه من الصعوبة نقله.

الفحم الشبيه بالفحم البيتومي به ٧٠ - ٨٠% كربون والمحتوى من الأكسجين يتراوح ما بين ١٠ - ٢٠%. القيمة الحرارية هي حوالي ٦٨٠٠ - ٧٦٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام. وهو يحترق بسهولة ويمكن استخدامه لرفع البخار لأغراض مختلفة.

فحم البيتومين (Bituminous Coal):

الفحم البيتومي هو النوع الأكثر شيوعا والأكثر استخداما من أنواع الوقود الصلب الحفري. الفحم البيتومي الجيد يتكون من شرائح متتالية باهتة ولامعة.

لكونه قصيف (Brittle)، فإن هذا الفحم ينكسر بسهولة إلى كتل رقيقة في شكل منشوري أو شبه مكعب عند حفرة. المحتوى من الكربون مرتفع ويتراوح من بين ٧٨ - ٩٠%. القيمة الحرارية بفحم البيتومين هي ما بين ٨٠٠٠ - ٨٥٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام. الفحم البيتوميني سهل التداول وله نوعية تسخين ممتازة. وهو يستخدم غالباً في معظم دول العالم. الفحم من هذا النوع (الرتبة) يستخدم بكميات كبيرة في الصناعة في عمل الكوك الميثالبرجي، غاز الفحم والبخار للتسخين المنزلي.

١. الفحم البيتوميني الفائق: (Superbituminous Coal)

الفحم البيتوميني الفائق هو أعلى درجات الفحم وبه نسبة عالية من الكربون تتراوح ما بين ٩٠ - ٩٥%. قيمته الحرارية تتراوح ما بين ٨٥٠٠ كيلو سعر حراري إلى ٨٦٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام. وهو غير منتج للسدخان (Smokeless) عند الحرق وله أفضل طاقة تسخين من بين أنواع الفحم. يستخدم الفحم البيتوميني الفائق في صناعة الكوك (Coke).

٢. فحم الأنثراسيت: (Anthracite)

الأنثراسيت هو المرحلة الأخيرة لتكون الفحم من المادة النباتية. وبه أكبر نسبة من الكربون (٩٢ - ٩٨%) وبه أدنى نسبة من المواد المتطايرة والسرطوية. وهو يحترق بلهب أزرق قصير غير مدخن. القيمة الحرارية للأنثراسيت حوالي ٨٦٠٠ كيلو سعر حراري/ كيلو جرام. وهو يحترق بحرارة محلية شديدة جداً. الأنثراسيت هو الأكثر صلابة من بين أنواع الفحم الأخرى. وله مظهر براق، أحياناً يبدو في شكل الجرافيت. وليس له قوة تكسّل أو قولبة. الاستخدامات الصناعية الرئيسية للأنثراسيت هي الغلايات، المواقد المنزلية (الدفايات) والأفران الميثالبرجية.

تحليل الفحم: (Analysis of Coal)

مكونات الفحم تختلف طبقاً لدرجة التفحيم. لمقارنة أنواع الفحم للاستخدام فإنه يتم

عمل التحاليل. الطرق التفصيلية للتحاليل والاختبارات وإن كانت تختلف من بلد إلى آخر إلا أنها تنقسم إلى قسمين:

١. تحاليل تقريبية.

٢. تحاليل كلية.

ويتم تسجيل نتائج التحاليل بالطرق الآتية:

- على أساس حالة الاستلام.
- على أسس الجفاف الهوائي.
- على أساس الخلو من الرطوبة (التجفيف في فرن التجفيف)
- على أساس الخلو من الرطوبة والرماد.

١- التحليل التقريبي: (Proximate Analysis)

التحليل التقريبي يعتبر تحليل اختباري هام. البيان يختلف طبقاً للطريقة المستخدمة ولذلك يسمى التحليل التقريبي. وهو يعطي معلومات عن الاستخدام العملي للفحم. التحليل الأولي للفحم يعين الرطوبة، الرماد، والمواد المتطايرة والكربون المثبت للفحم.

أ- المحتوى من الرطوبة:

طبقاً لطبيعة وأصل الفحم فإنه دائماً مرتبط بالرطوبة. عند تعرض الفحم الرطب إلى الجو، فإن الرطوبة الخارجية تتبخر ولكن الفحم الجاف ظاهرياً يظل محتوياً على بعض الرطوبة. هذه الرطوبة تعرف بأنها رطوبة تجفيف الهواء. رطوبة تجفيف الهواء يتم تعيينها بتسخين كمية معلومة من الفحم (بالجفاف الهوائي إلى ١٠٥ - ١١٠ °م في فرن كهربائي هوائي ساخن لمدة حوالي ساعة. بعد الساعة يتم سحبه من الفرن وتبريده في مجفف ووزنه. الفقد في الوزن للفحم يتم تسجيله كمحتوى من الرطوبة على أساس نسبة مئوية.

$$\text{النسبة المئوية للرطوبة} = \frac{\text{الفقد في الوزن}}{\text{وزن عينة الفحم}} \times 100$$

ملاحظة:

- زيادة الرطوبة في الفحم غير مرغوبة.
 - الرطوبة تقلل القيمة الحرارية للفحم وتأخذ كمية كبيرة من الحرارة المنتجة في شكل حرارة كامنة للبخر. لكل نسبة مئوية من الرطوبة الموجودة. يفقد ١% من الحرارة. الرطوبة كذلك تزيد تكاليف النقل.
 - زيادة الرطوبة السطحية قد تسبب صعوبة في تداول الفحم.
 - زيادة وجود الرطوبة تعمل على تبريد اللهب في الفرن.
- لذلك فإن قلة المحتوى من الرطوبة، تعني نوعية فحم أفضل كوقود. ولكن وجود حوالي ٥ - ١٠% رطوبة يكون مرغوباً فيه لأنه ينتج طبقة وقود متجانسة والقليل من الرمادي المتطاير.

ب- المادة المتطايرة:

المادة المتطايرة في الفحم تتكون من خليط معقد من المنتجات الغازية والسائلة نتيجة التحلل الحراري للفحم. المادة المتطايرة لا تشمل الرطوبة في الفحم. وهي تتكون أساساً من غازات قابلة للاحتراق مثل H_2 ، CO ، CH_4 و مواد كربوهيدراتية أخرى (Carbohydrates).

يتم تعيينها بتسخين وزن معين من عينة الفحم الخالية من الرطوبة في بوتقة غير مغطاة من البلاتين عند درجة حرارة $950 \pm 20^\circ C$ لمدة سبع دقائق. عند درجة الحرارة هذه، يتم طرد الهيدروكربونات والهيدروجين.

يتم تبريد البوتقة، أولاً في الهواء، ثم داخل مجفف (Dessicator) ووزنها. الفقد في الوزن يتم تسجيله كمادة متطايرة على أساس نسبة مئوية.

الفقد في الوزن بسبب إزالة المادة المتطايرة

$$\frac{\text{النسبة المئوية للمادة المتطايرة}}{\text{وزن عينة الفحم}} = 100 \times$$

ملاحظات:

- النسبة العالية من المادة المتطايرة تبين أن نسبة كبيرة من الوقود حُرقت كغاز أو بخار وقد تنطلق بدون حرق.
 - المحتوى العالي من المادة المتطايرة يعطي لهب طويل، دخان كثيف وقيمة حرارية منخفضة نسبياً.
 - للاستخدام الكفء للفحم، فإن الغازات الخارجة القابلة للاحتراق (المادة المتطايرة) يجب حرقها بتوفير هواء ثانوي. وهذا يتطلب مساحة ضخمة للحرق. الفرن بحجم الحرق الصغير أو اللهب القصير يكون غير مناسب لحرق الفحم ذو المواد المتطايرة العالية، ذلك لأن كمية كبيرة من المواد المتطايرة سوف يهرب بدون حرق.
 - الفحم ذو المواد المتطايرة العالية لا يشكل جيداً في شكل قالب (cake) بينما الفحم ذو المستوى المتوسط من المواد المتطايرة المحتوي على ٢٠ - ٣٠% مواد متطايرة يمكنه تكوين قالب قوي وصلب عند الكربنة.
 - الفحم المحتوي على أقل من ١٤% من المواد المتطايرة لا يمكن تشكيله في قالب مطلقاً ولذلك لا يكون مناسباً في تصنيع الكوك.
 - ولكن المحتوى العالي من المواد المتطايرة يكون مطلوباً في صناعة غاز الفحم (Coal Gas) حيث أن المواد المتطايرة في الفحم تدل على نسبة الفحم الذي سوف يتحول إلى منتجات من الغاز والقار بالحرارة.
- حج الرماد: (Ash)
- الفحم يحتوي على مواد غير عضوية معدنية التي تتحول إلى رماد بالتفاعلات

الكيميائية أثناء حرق الفحم. الرماد عادة يتكون من السيليكا، الألومينا، أكسيد الحديد وكميات صغيرة من الجير الحي (CaO) ، الماجنيزيا (MgO). الخ. المحتوى من الرماد يتم تعيينه بتسخين المتبقي بعد إزالة المادة المتطايرة عند ٧٠٠ ± °م لمدة نصف ساعة بدون غطاء.

$$\text{نسبة الرماد} = \frac{\text{وزن المتبقي}}{\text{وزن عينة الفحم}} \times 100$$

يمكن تقسيم الرماد كرماد أصيل وكرماد عارض. المادة المعدنية الموجودة أصلاً في المادة النباتية التي تكون منها الفحم تسمى الرماد الأصلي (Intrinsic Ash) ويتكون من Na ، K ، Mg ، Ca ، Si.

على الجانب الآخر، المادة المعدنية مثل الطفل، الجبس، مواد أخرى التي تختلط أثناء عملية استخراج الفحم من المنجم أو تداول الفحم تمثل الرماد العارض (Extrinsic Ash) والذي يظل كمتبقي بعد الحرق. هذا الرماد العارض قد يتكون من المركبات اللامائية الآتية:

$$\text{CaSO}_4, \text{CaCO}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \dots \text{الخ.}$$

المواد المعدنية المسببة لوجود الرماد العارض لا يمكن إزالتها بأي وسيلة ميكانيكية. لحسن الحظ هذا المحتوى من المادة المعدنية يكون منخفضاً (حوالي ٢ - ٣ %) بينما المحتوى من الرمادي الأصلي يكون مرتفعاً.

ملاحظات:

- النسبة العالية من الرماد غير مرغوب فيها. الرماد لا يساهم في الطاقة الحرارية للفحم. على العكس فإنه يقلل القيمة الحرارية ويسبب كثيراً من الصعوبات لاستخدام الفحم بكفاءة.
- في فرن بالمصبعات (الشبكة) الحديدية، يمكن أن يعيق الرماد مرور الهواء ويقلل معدل الحرق.
- الرماد العالي يؤدي إلى فقد كبير في الحرارة ويسبب مشاكل لتكوين كتل من

①

- الرماد (Clinkers). تم تقدير أن ارتفاع ١% في رماد الفحم يكافئ من ٣,٠ - ٤% خفض في كفاءة الغلاية.
- مكونات الرماد ومجال الانصهار يؤثر كذلك على كفاءة الفحم. مكوناته ذات أهمية كبيرة في العمليات الميتالرجية التي تؤثر على مكونات الخبث والمعدن.
- عند استخدام الفحم في الغلاية، فإن درجة حرارة انصهار الرماد تكون ذات أهمية كبيرة. عموماً درجة حرارة الانصهار تقع في المجال ما بين ١٠٠٠ - ١٧٠٠ °م. الرماد الذي درجة حرارة انصهاره أقل من ١٢٠٠ °م يسمى المنصهر (Fusible) وأكثر من ١٤٣٠ °م يسمى الرماد المنيع. في حالة انصهار الرماد عند درجة حرارة التشغيل فإنه يؤدي إلى تكون كتل من الرماد (Clinker).
- بصرف النظر عن الفقد في كفاءة الفحم، فإنه تكون كتل أو كرات من الرماد يؤدي إلى فقد في الوقود حيث أن بعض حبيبات الوقود تحتويها هذه الكتل. ولكن بعض من الرماد يكون مرغوباً فيه حيث أنه يحمي المصبغات الحديدية الشبكية من الالتصاق المباشر بالفحم المتوهج والذي يمكن أن يسبب الأكسدة لأسياخ المصبغات الحديدية (Grate).

د- الكربون المثبت: (Fixed Carbon)

المحتوى من الكربون المثبت يزداد من الفحم ذو الرتبة المنخفضة مثل اللجنيت إلى الفحم ذو الرتبة العالية مثل الأنثراسيت. زيادة نسبة الكربون المثبت تعني زيادة القيمة الحرارية وكذلك النوعية الأفضل للفحم. هذا يمثل كمية الكربون التي يمكن حرقها بالتيار الأولي للهواء. نسبة الكربون المثبت يتم تعيينها بالآتي:

$$\text{نسبة الكربون المثبت} = 100 - [\text{نسبة الرطوبة} \% + \text{المادة المتطايرة} + \text{الرماد}]$$

من المعادلة السابقة، يبدو أن ما يترك بعد طرح كمية الرطوبة والمواد المتطايرة

والرماد المتكون يساوي الكربون المثبت. ولكن، مصطلح الكربون المثبت غير دقيق حيث أنه يحتوي على عناصر أخرى غير متطايرة مع الكربون.
ملاحظات:

- زيادة نسبة الكربون المثبت يقابلها زيادة في القدرة الحرارية.
- نسبة الكربون المثبت تساعد في تصميم الفرن وشكل صندوق الحرق ذلك لأن الكربون المثبت يحترق وهو في الحالة الصلبة.

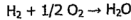
٢- التحليل الكلي: (Ultimate Analysis)

التحليل الكلي للفحم يتم لتأكيد مكونات الفحم. عند استخدام الفحم في الأغراض الصناعية يكون من الضروري تعيين نسبة المكونات وذلك لإمكان تصنيف نوعية الفحم، وتعيين سعره، هذا بالإضافة إلى وضع الفحم في الاستخدامات المختلفة طبقاً لمكوناته.

التحليل الكلي يتضمن تقدير الكربون، الهيدروجين، الكبريت، النيتروجين والأكسجين.

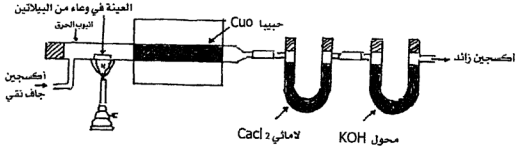
أ- الكربون والهيدروجين: شكل (١/٣)

يتم وضع عينة معلومة من الفحم في أنبوب الحرق ويتم الحرق في كم زائد من الأكسجين النقي (خالٍ من الرطوبة ومن CO_2). الكربون والهيدروجين الموجود في الوقود يتحول إلى CO_2 ، H_2O على التوالي.
$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

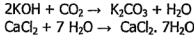


المنتجات الغازية للحرق يتم تمريرها خلال بصيلتين (2 Bubbles) أحدهما تحتوي على كمية موزونة من $CaCl_2$ الذي يمتص الماء، والأخرى تحتوي على كمية موزونة من KOH الذي يمتص ثاني أكسيد الكربون.

يتم حساب نسبة الكربون والهيدروجين من الزيادة في وزن كلا أنبوبي الامتصاص.



شكل (١/٣) تقدير الكربون والهيدروجين



بفرض أن وزن عينة الفحم = X جرام

الزيادة في وزن أنبوب CaCl_2 = Z جرام

الزيادة في وزن أنبوب KOH = Y جرام

٤٤ جرام من CO_2 تحتوي = ١٢ جرام من الكربون.

Y جرامات من CO_2 يحتوي = $\frac{Y \times 12}{44}$ من الكربون

٤٤

١٨ جرام من الماء تحتوي = ٢ جرام من الهيدروجين

Z جرامات من الماء تحتوي = $\frac{Z \times 2}{18}$ جرامات من الهيدروجين.

١٨

نسبة الهيدروجين = $\frac{Z \times 100}{18} \times \frac{2}{44}$ وزن عينة الفحم

ملاحظات:

- القيمة الحرارية للوقود تتناسب مع محتواها من الكربون. لذلك فإن زيادة المحتوى من الكربون تمثل زيادة في القيمة الحرارية للوقود.
- زيادة نسبة الكربون كذلك تقلل حجم غرفة الحرق.

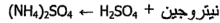
- زيادة نسبة الهيدروجين تزيد كذلك القيمة الحرارية للفحم. محتوى الفحم من الهيدروجين يتراوح ما بين ٤,٥ إلى ٦,٥ % من فحم المستنقعات إلى مرحلة الفحم البتوميني. الهيدروجين في الفحم مسئول عن إنتاج كثيرا من المواد المفيدة/ مثل، الهيدروجين الغازي، الميثان وكماويات الفحم في صناعات الكربنة (Carbonization) وصناعة الغازات.

ب- النيتروجين: شكل (١/٤)

النيتروجين الموجود في عينة الفحم يمكن تقديره بالطريقة الآتية:

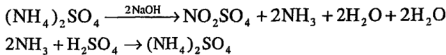
- وزن عينة من الفحم مع $K_2SO_4 + HgSO_4$ الذي يعمل كعامل وسيط يتم تسخينه مع حامض كبريتيك مركز (H_2SO_4). النيتروجين الموجود في الفحم يتحول إلى $[(NH_4)_2 SO_4]$ كميا.

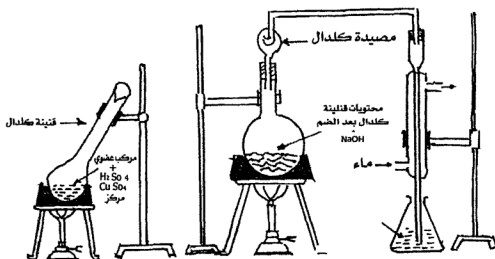
حرارة



(من الفحم)

- يتم عندئذ نقل المحتويات إلى قنينة ذات قاع مستدير ويتم تسخين المحلول مع زائد من (NaOH).
- غاز NH_3 الذي ينطلق يتم امتصاصه في حجم معين من محلول حامض عياري.
- الحامض الغير مستخدم يتم عندئذ تعيينه بالمعايرة بـ (NaOH).
- من حجم الحامض المستخدم بواسطة NH_3 المنطلق، يمكن حساب نسبة النيتروجين.





(أ) هضم (تسخين في قنبلة ككلدال)

(ب) تقطير ككلدال

شكل (١/٤) تقدير النيتروجين بطريقة ككلدال

بفرض أن وزن عينة الفحم = W جرام

حجم الحامض المستخدم (المستهلك) = V_1 سم^٣

عيارية الحامض = N_1

V_1 سم^٣ من حامض عياري = $N_1 \times ٧٧$ سم^٣ لـ NH_3

إذن V_2 سم^٣ لـ INN_3 = $N_1 \times V_1$ سم^٣ من الحامض

ولكن ١٠٠٠ سم^٣ لوحد عياري.

محلول الأمونيا = ١٧ جرام من NH_3 = ١٤ جرام من النيتروجين

V_2 سم^٣ لمحلول أمونيا واحد عياري = $N_1 \times ١٤$ = V_1 جرام من النيتروجين.

١٠٠٠

(بما أن $N_1 V_1 = V_2$ سم^٣)

$$\frac{V_1 \times N_1 \times ١,٤}{W} = \frac{١٠٠٠ \times V_1 \times N_1 \times ١٤}{W \times ١٠٠٠}$$

المحتوى من النيتروجين في معظم الفحم يكون ما بين ١ - ٢%. وهو ليس له قيمة حرارية وبالتالي فإن وجوده غير مرغوب فيه. ولكنه مفيد في صناعات الكربنة والتي تستعيد جزء منه كمنتجات ثانوية ذات قيمة مثل NH_3 ، $(NH_4)_2SO_4$ وكذلك أساس بيريدين (وهو مذيب أروماتي).

ج- الكبريت:

الكبريت الموجود في الفحم يتأكسد بواسطة حامض النيتريك المركز إلى حامض الكبريتيك. يتم ترسيب حامض الكبريتيك ككبريتات باريوم ($BaSO_4$) بإضافة ($BaCl_2$) كميًا. كذلك، يمكن كذلك تعيين الكبريت بالغسيل الناتج من كتلة معلومة من الفحم المستخدم في قنبلة مقياس السعر الحراري لتعيين قيمتها الحرارية. الغسيل يحتوي على كبريت في شكل الكبريتات حيث يرسب بإضافة ($BaCl_2$) إلى ($BaSO_4$). راسب $BaSO_4$ من أي من الطرق السابقة يتم ترشيحه وتسخينه إلى وزن ثابت. من وزن $BaSO_4$ يتم حساب الكبريت الموجود في الفحم.

إذا كان وزن عينة الفحم = W جرام.

وكتلة الراسب = W_1 جرام

بما أن ٢٣٣ جرام من $BaSO_4$ = ٣٢ جرام من الكبريت

$$W_1 \text{ جرام من } BaSO_4 = \frac{32}{233} W_1 \text{ جرام}$$

$$\text{نسبة الكبريت} = \frac{100 \times W_1 \times 32}{W \times 233}$$

ملاحظات:

رغم أن الكبريت يساهم في القيمة الحرارية للفحم، إلا أنه مكون غير مرغوب فيه. فهو ينتج SO_4 ، SO_3 أثناء الحرق وكذلك المنفر H_2S أثناء كربنة الفحم. هذه الغازات تسبب كذلك تلوث للبيئة الجوية. الفحم المحتوي على الكبريت غير مناسب

لتحضير الكوك الميثاليرجي لأن له تأثير سلبي على خواص المعدن.
فمثلا فإن وجود الكبريت في الكوك المستخدم في صناعة الحديد يؤثر على نوعية
وخواص الصلب.

د- الرماد:

الرماد يتم تعيينه بنفس الطريقة كما في حالة التحليل التقريبي.

هـ- الأكسجين:

الأكسجين عادة يتم تعيينه بطريقة الفرق. يعبر عن الكربون، الهيدروجين،
النيتروجين والكبريت على أساس نسبة مئوية ومجموعهم يتم طرحه من ١٠٠.
النسبة المئوية للأكسجين = ١٠٠ - (النسبة المئوية $C + H_2 + N_2$ + رماد)
ملاحظات:

كلما قل المحتوى من الأكسجين في الفحم كلما كان الفحم أفضل. هذا لأن
المحتوى من الأكسجين في الفحم عادة يصاحبه الرطوبة، قيمة حرارية منخفضة وقوة
تكويك منخفضة. بالإضافة إلى أن الأكسجين يكون في شكل متحد مع الهيدروجين في
الفحم وبذا يقل حجم الهيدروجين المتاح للاحتراق عن إجمالي الهيدروجين الموجود.
القيمة الحرارية تقل بحوالي ١,٧% لكل ١% زيادة في الأكسجين.

٣- أمثلة على التحاليل الأولية والكلية:

مثال:

عينة من الفحم تم تحليلها كالاتي:

تم وزن ٢ جرام في بوتقة من السيليكا. بعد التسخين لمدة ساعة عند ١١٠ °م
كان وزن الراسب المتبقي ١,٩٧٥ جرام. البوتقة التالية كانت مغطاة بغطاء للتفتيش
والتسخين القوي لمدة سبعة دقائق تماما عند ٩٥٠ ± ٢٠ °م. وزن الراسب ١,٣٢٨
جرام. تم تسخين البوتقة عندئذ بدون غطاء، حتى الحصول على وزن ثابت. الراسب

الأخير وجد أنه يزن ٠,٢٠٥ جرام.

إحسب نسبة نتائج التحاليل السابقة.

الحل:

كتلة الرطوبة في عينة الفحم = ٢ - ١,٩٧٥ = ٠,٠٢٥ جرام

كتلة المواد المتطايرة = ١,٩٧٥ - ١,٣٢٨ = ٠,٦٤٧ جرام

كتلة الرماد = ٠,٢٠٥ جرام

النسبة المئوية للرطوبة = $\frac{١٠٠ \times ٠,٠٢٥}{٢} = ١,٢٥\%$

النسبة المئوية للمواد المتطايرة = $\frac{١٠٠ \times ٠,٦٤٧}{٢} = ٣٢,٣٥\%$

نسبة الرماد = $\frac{١٠٠ \times ٠,٢٠٥}{٢} = ١٠,٢٥\%$

نسبة الكربون المثبت = $١٠٠ - (١٠,٢٥ + ٣٢,٣٥) = ٥٦,١٥\%$

مثال:

استخدم واحد جرام من الفحم في قنبلة قياس السعر الحراري لتعيين القيمة الحرارية. القيمة الحرارية للفحم وجد أنها ٨٨٠٠ سعر/الجرام. الرماد المكون في قنبلة مقياس السعر الحراري تم استخلاصه بالحامض ثم تم تسخين استخلاص الحامض (Extracted) مع محلول نترات الباريوم وتم الحصول على راسب من كبريتات الباريوم. تم ترشيح الراسب وتجفيف ثم وزنه. وزن الراسب وجد أنه ٠,٠٨ جرام. احسب نسبة الكبريت في عينة الفحم.

الحل:

نسبة الكبريت في عينة الفحم = $\frac{١٠٠ \times ٣٢ \times \text{BaSO}_4 \text{ راسب}}{٢٣٣ \times \text{وزن عينة الفحم في القنبلة}}$

$$= \frac{0.08 \text{ جرام} \times 32 \times 100}{233 \times 1 \text{ جرام}} = 1.098\%$$

مثال:

تم تحليل عينة من الفحم، وكان غاز NH_3 المنبعث تم امتصاصه في ٥٠ سم^٣ من ٠,١ عياري H_2SO_4 . بعد الامتصاص الحامضي الزائد (المتبقي) تطلب للتعاادل ٦,٢٥ سم^٣ من ٠,١ عياري (NaOH) ٢,٦٠ جرام من الفحم في التحليل الكمي أعطت ٠,١٧٥٥ جرام من BaSO_4 .

احسب نسبة N ، S في عينة الفحم.

الحل:

٦,٢٥ سم^٣ من ٠,١ عياري إيدروكسيد الصوديوم (0.1 N NaOH)

$$= 6.25 \text{ سم}^3 \text{ من } (0.1N \text{ H}_2\text{SO}_4).$$

إن حجم H_2SO_4 المستخدم لمعادلة NH_3 الصاعدة

$$= 50 \text{ سم}^3 \text{ من } 0.1 \text{ عياري} - 6.25 \text{ سم}^3 \text{ عياري } \text{H}_2\text{SO}_4$$

$$= 43.75 \text{ سم}^3 \text{ من } 0.1 \text{ عياري } \text{H}_2\text{SO}_4$$

$$\text{نسبة النيتروجين} = \frac{\text{حجم } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ المستخدم} \times \text{العيارية} \times 1.4}{\text{وزن عينة الفحم}}$$

وزن عينة الفحم

$$= \frac{1.4 \times 0.1 \times 43.75}{3.926} = 1.56\%$$

$$1.56$$

$$\text{نسبة الكبريت} = \frac{\text{وزن راسب } \text{BaSO}_4 \times 32}{100}$$

$$= \frac{233 \times \text{وزن عينة الفحم}}{233}$$

$$= \frac{100 \times 32 \times 0.1755}{0.927} = 5.97\%$$

$$2.60 \times 233$$

٤- كربنة الفحم (صناعة الكوك)

Carbon ation of Coal (Manufacture of Coke)

كربنة الفحم هي عملية تسخين الفحم في معزل عن الهواء، إلى درجة حرارة عالية، تكفي لإحداث تحلل في الفحم وإنتاج متبقي غني بمحتواه من الكربون أكثر من الوقود الأصلي. هذا المتبقي يكون لامعاً، كثيف، قوي ومسامي وفي شكل كتلة مدمجة ويعرف بالكوك. بمعنى آخر فإن عملية تحويل الفحم إلى كوك تسمى كربنة.

الفحم الكوكي وفحم الكوك: (caking and Coking of Coals)

يجب التأكيد على أن كل أنواع الفحم لا يمكن تحويلها إلى الكوك. بعض أنواع الفحم له استعداد لبلين وينتفخ عند درجات الحرارة العالية، ليكون كتلة صلبة مدمجة ذات بناء مسامي. هذا النوع من الفحم يسمى الفحم الكوكي (Caking Coals). المتبقي يسمى الكوك (Coke). أما إذا كان المتبقي صلب وأقوى من الفحم الذي تكون منه فإنه يسمى فحم الكوك (Coking Coal). هذه الصفة توجد فقط في نوع الفحم الببتيوميني، ولذلك فإن الفحم الذي يمكن تكويكه هو الفحم الببتيوميني فقط. فحم الأنتراسيت، فحم اللجنيت والفحم الببتيوميني المتدني (Sub-Bituminous) هذه أنواع من الفحم لا تتحول إلى الكوك. كل أنواع فحم الكوك هي فحم كوكي، ولكن قليل فقط من الفحم الكوكي يقع تحت تصنيف فحم التكويك (Coking). عموماً، الفحم المحتوي على نسبة عالية من المواد المتطايرة يكون غير مناسباً للتكويك ويستخدم في إنتاج الغاز. الفحم المحتوي على ٢٠ - ٣٠% من المواد المتطايرة هو فحم جيد لإنتاج الكوك.

طريقة الكربنة:

أولاً يتم التخلص من الرطوبة والمحتوى من الغازات.

عند حوالي ٢٦٠ °م - ٢٧٠ °م الكربون والماء و H_2S وبعض المواد العضوية ذات الوزن الجزيئي المنخفض مثل (Alkenes, Alkanes) تتبعث.

عند حوالي ٤٠٠ °م فإن الفحم الكوك (Caking) يصبح لين ولين.

عند حوالي ٧٠٠ °م ينبعث الهيدروجين.

عند حوالي ٨٠٠ °م تتبعث المنتجات الغازية الرئيسية.

الغازات المنبعثة تكون الكتلة اللدنة، تعمل على تمدها لتعطي شكل الفوم (الراغوي). عند درجة حرارة أعلى هذه الكتلة التي تشبه الفوم تتصلب لتكون كتلة صلبة ذات بناء مسامي والذي يسمى الكوك.

أنواع الكربنة

خواص الكوك المنتج تعتمد أساسا على نوع الفحم المستخدم، درجة حرارة الكربنة ومعدل الكربنة. طبقا لدرجة الحرارة، فإن الكربنة تكون من نوعين:

- كربنة درجة الحرارة المنخفضة.
- كربنة درجة الحرارة العالية.

كربنة درجة الحرارة المنخفضة:

عند عمل التقطير الإتلافي للفحم عند درجات حرارة ما بين ٥٠٠ - ٧٠٠ °م، فإن هذا يسمى كربنة درجة الحرارة المنخفضة. هذه العملية تتم لإنتاج شبه الكوك (semi-coke) والذي يسمى الكوك اللين أو تفحم (char).

إنتاجية الكوك تكون حوالي ٧٠ - ٨٠%. الكوك المنتج بهذه الطريقة يحتوي على ٥ - ١٥% مواد متطايرة وليس قوي بما يكفي لاستخدامه كوقود ميتاليرجي.

المنتجات المختلفة للكربنة منخفضة ذات الحرارة هي شبه الكوك، (semi coke)، القار منخفض درجة الحرارة، غاز وكحول خام عند الحرارة القليلة. نوعية وإنتاجية لهذه المنتجات يتوقف على الطريقة المستخدمة والفحم المستخدم. مصانع الكربنة عند درجة الحرارة المنخفضة من الطبيعي أنها تستخدم الفحم برتبة منخفضة. هذه الأنواع من الفحم ذات الرتبة المنخفضة تنتج دخان كثيف عند الحرق، ولكن الكوك المنتج منهم يكون وقود نظيف.

شبه الكوك من الكربنة عند درجات الحرارة المنخفضة يمكن حرقه بسهولة إلى لهب بدون دخان. وهو يعتبر وقود منزلي مثالي. الغاز الذي يتم الحصول عليه

كمنتج ثانوي له قيمة حرارية أعلى، حوالي ٦٥٠٠ - ٩٥٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام. إنتاجية الغاز ١٣٠ - ١٥٠ متر مكعب من كل طن من الفحم المكربن وبشكل وقود قيم. القار الذي يتم الحصول عليه كذلك كمنتج ثانوي يحتوي على كثير من الهيدروكربونات البارافينية وكمية قليلة من الهيدروكربونات الأروماتية، مع الفينولات العالية ومختلف المركبات النيتروجينية المستبدلة.

الكربنة عند درجة الحرارة العالية:

كربنة الحرارة العالية هي عند درجة حرارة من ٩٠٠ - ١٢٠٠ °م. تستخدم كربنة درجة الحرارة العالية لإنتاج الكوك المتبايرجي النقي، الصلب، القوي والسامي المحتوي على ١ - ٣ % من المواد المتطايرة. إنتاجية الكوك هي من ٦٥ - ٧٥ %.

المنتجات الثانوية - الغاز والقار له كميات أكبر من الهيدروكربونات الأروماتية (Aromatic). الغاز الذي يتم إنتاجه له قيمة حرارية منخفضة حوالي ٥٠٠٠ - ٦٠٠٠ كيلو سعر حراري/ المتر المكعب أقل من ذلك المنتج بواسطة الكربنة عند درجة الحرارة المنخفضة، ولكن لإنتاجية الغاز أعلى (٣٧٠ - ٤٨٠ م^٣/طن). تكوين كميات أقل من البارافينات وكميات أعلى من الغاز، تبين أن تكسير مركبات البارافين الموجود في الفحم يحدث عند درجة حرارة مرتفعة، بما ينتج عنه تكون الغازات وزيادة الأروماتية (Aromatization). الكوك المنتج أكثر صلابة عن الكوك المنتج بواسطة الكربنة عند درجة الحرارة المنخفضة، ولذلك فإنه يسمى الكوك الصلب (Hard coke). وهو يستخدم كوقود في الصناعة وكذلك في الاستخدام المنزلي.

جدول () مقارنة للكرينة منخفضة درجة الحرارة وعالية درجة الحرارة

الخاصية	الكرينة منخفضة درجة الحرارة	الكرينة عالية درجة الحرارة
١- درجة حرارة للكرينة	٥٠٠ - ٧٠٠ م°	١٠٠٠ - ١٢٠٠ م°
٢- الإنتاجية	٧٥ - ٨٠ %	٦٥ - ٧٥ %
٣- المواد المتطايرة	٥ - ١٥ %	١ - ٣ %
٤- القوة الميكانيكية	ليست قوية ميكانيكيا	قوية ميكانيكيا
٥- الصلابة	كوك لين	كوك صلب
٦- الاستخدام	للأغراض المنزلية	للأغراض الميتالرجية
٧- إنتاجية الغاز	منخفض (١٣٠-١٥٠ م°/طن)	مرتفع (٣٠٠ - ٣٩٠ م°/طن)
٨- القيمة الحرارية للغاز	مرتفعة (٦٥٠٠-٩٥٠٠ كيلوسعر/م³)	منخفضة (٥٤٠٠-٦٠٠٠ كيلوسعر/م³)
٩- نسبة الهيدروكربونات بالتسلسل المستقيم في المنتجات الثانوية (قار وغاز)	مرتفعة	منخفضة
١٠- نسبة المواد الأروماتية في المنتجات الثانوية.	منخفضة	مرتفعة
١١- اللخان المنتج عند الحرق	بنون دخان	منتج للدخان

٥- الكوك الميتالرجي: Metallurgical Coke

خواص الكوك تتوقف على المسامية، القدرة على التفاعل (Reactivity)، وكمية المادة المتطايرة المحتجزة في الكوك أثناء الكرينة. يستخدم الكوك أساسا كمصدر للحرارة وكعامل اختزال في الميتالرجي (الصناعات المعدنية). الكوك الجيد المستخدم في العمليات الميتالرجية يجب أن يحقق المتطلبات الآتية:

النقاء:

الكوك الميتالرجي يجب أن يحتوي على أقل نسبة من الرطوبة والرماد والكبريت والفوسفور. الرطوبة تقلل القيمة الحرارية بينما الرماد يعيق التسخين وكذلك يحد من مرور الهواء ويقلل معدل الاحتراق. نسبة الرماد العالية تساعد كذلك في تكوين الخبث (slag).

في حالة وجود الكبريت والفوسفور فإن ذلك له تأثير سلبي على المنتج الذي يتم إنتاجه.

المسامية Porosity:

يجب أن يكون الكوك مسامي لتوفير الالتصاق بين الكربون والأكسجين والذي يؤكد الحرق التام المتقن للوقود في الفرن.

القوة Strength:

الكوك المستخدم في العمليات الميثالرجية يجب أن يكون له قوة عالية ليتمكنه تحمل وزن الخام، مادة خفض درجة حرارة الانصهار (Flux)...الخ في الفرن.

الحجم:

الكوك الميثالرجي يجب أن يكون بحجم متوسط - ليس كبيرا جدا وليس صغيرا جدا. الحجم الكبير للكوك لا يعطي تسخين متجانس بينما في حالة الحجم الصغير جدا، فإنه يمكن أن يسبب الانسداد.

سهولة الحرق Combustibility:

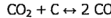
يجب أن يحترق الكوك بسهولة. قابلية الكوك للحرق تتوقف على طبيعة الفحم، درجة حرارة الكربنة ودرجة حرارة التفاعل. الفحم ضعيف الكوكي أو لا يحدث له كوكي (Non caking) يكون أكثر قابلية للاحتراق مقارنة بفحم الكوك القوي. درجة حرارة الكربنة المنخفضة تنتج كوك سهل الاحتراق مقارنة بذلك المنتج بالكربنة عند درجة الحرارة العالية. ولكن عند درجة حرارة الحرق العالية (٨٠٠ - ٩٠٠ °م) فإن كل الكوك له استعداد للحرق مماثل تقريبا. عند درجة حرارة حول ١٠٠٠ °م ، يتوقف معدل الحرق على معدل الإمداد بالهواء.

القيمة الحرارية: (colorific value)

القيمة الحرارية يجب أن تكون مرتفعة.

القدرة على التفاعل: (Reactivity)

القدرة على تفاعل الكوك يعني بها قدرته على التفاعل مع CO_2 ، البخار، الهواء أو O_2 . القدرة على التفاعل يجب ألا تكون مرتفعة جدا. ولكن الكوك المستخدم في إنتاج غاز الماء (water gas) - وهو مزيج من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون) يجب أن يتفاعل مع بخار الماء. التفاعل مع CO_2 يمثل اختزال CO_2 طبقا للمعادلة:



(غاز) (صلب) (غاز)

وله أهمية في صناعة غاز الإنتاج (Producer gas).

تصنيع الكوك الميثاليرجي:

الكوك المطلوب للأغراض الميثاليرجية يمكن إعداده بطريقتين وهما:

١. فرن خلية النحل (Bee hive oven)

٢. فرن أوتوهوفمان (OttoHoffmann Oven)

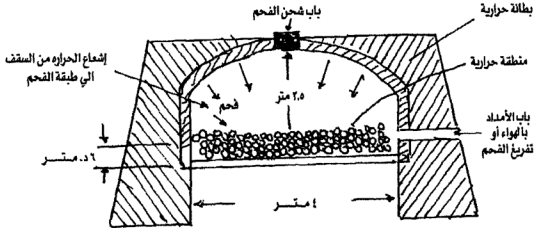
فرن خلية النحل: شكل (١/٥)

بمنهاية القرن التاسع عشر، كانت كل متطلبات الكوك الميثاليرجي للعالم تم توفيرها بتصنيع الكوك في أفران خلية النحل. فرن خلية النحل عبارة عن غرفة من الطوب الحراري له بناء في شكل القبو. وهي تشبه خلية النحل. أبعاد الفرن هي ٤ متر عرض، ٢,٥ متر ارتفاع. السقف مزود بفتحة لدخول الفحم من أعلى. فتحة أخرى وهي فتحة التصريف توجد في محيط الجزء السفلي من الحائط. يتم بناء عدد من الأفران في صف بحوائط مشتركة بين الأفران المتجاورة. يتم إدخال الفحم من الفتحة العليا في القبو وينتشر بالتساوي على الأرضية لتكوين طبقة بعمق حوالي ٦٠ - ٩٠ سم. يتم أولا إدخال بعض الهواء لحرق الفحم. تبدأ الكربنة وتحترق المواد المتطايرة داخل الباب الجانبي الغلق جزئيا. تستمر الكربنة من القمة للشحنة إلى قاع الشحنة. وتتم في يومين أو ثلاث أيام. يتم توفير الحرارة بحرق المواد المتطايرة ولذلك

لا يتم استعادة منتجات ثانوية. الغازات العادمة يسمح لها بالخروج إلى الجو. بعد نهاية الكربنة، يتم تبريد الكوك الساخن (quenched) بالماء وتفرغه يدويا خلال الباب المنزلق. حوايط وسقف الفرن الفارغ تحتفظ بحرارة كافية لبدء كربنة الشحنة التالية. إنتاجية الكوك هو حوالي ٨٥% من شحنة الفحم. يمكن تشغيل العملية اقتصاديا باستخدام سلسلة من الأفران بحيث أن غازات الفرن الساخن التي تنطلق إلى الجو تستخدم في حرق الشحنة في الفرن المجاور.

سلبيات أفران خلية النحل:

- لا يتم استعادة المنتجات الثانوية والتي هي كيماويات مفيدة حيث يسمح لها بالصر في الجو.
 - انخفاض إنتاجية الكوك بسبب الاحتراق الجزئي.
 - عدم مرونة العملية.
- على الرغم من السلبيات السابقة، فإن أفران خلية النحل ما تزال تستخدم بسبب قلة تكلفتها الرأسمالية والجارية.



شكل (١/٥) فرن خلية النحل للكوك

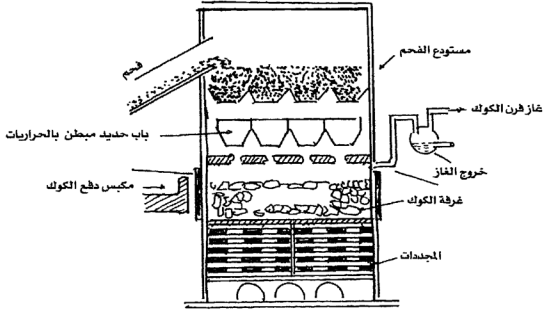
فرن أوتوهوفمان المنتج الثانوي: شكل (١/٦)، (١/٧)، (١/٨)

فرن خلية النحل تم استبداله بأفران الحجر في معظم الحالات وهذه تعمل

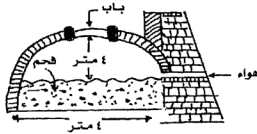
بمبدأ الاسترجاع لاقتصاديات الحرارة، أي استخدام الفقد في حرارة غازات عادم الوقود لتسخين الطوب.

الإنشاء:

فرن أوتو وفمان يتكون من عدد من الغرف الضيقة المستطيلة المصنعة من طوب السيليكا. الغرف متلاصقة بما لا يمكن من دخول الهواء. أعلى كل غرفة توجد ثلاث فتحات للتغذية بالفحم. كل غرفة مجهزة بفتحة لسحب الهواء وباب من الحديد الزهر المبطن بالحراريات عند كل نهاية لتصريف الكوك. غرف الكربنة هذه تتشأ جنباً إلى جنب مع وجود مداخل رأسية أو مساحة داخلية للحرق فيما بينهم. الأفران (الغرف) تكون في شكل بطارية من ١٠ إلى ١٠٠ فرن. الفرن الواحد قادر على احتواء ١٢ إلى ٢٤ طن من الفحم.



شكل (١/٦) مخطط يوضح غرفة واحدة من غرف
أوتوهوفمان



شكل (١/٧) فرن خلية النحل

أشكال (١/٦)، (١/٧)

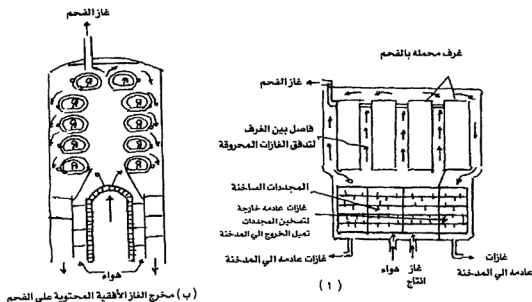
العمل: (Working) شكل (١/٨)

يتم إدخال الفحم إلى الغرفة ثم قفل الغرف بإحكام عند كلا الجانبين. يتم تسخين أفران الكوك إلى 1200°C بحرق الوقود الغازي (عادة غاز فرن الكوك). يستخدم مبدأ الاسترجاع لتحقيق التسخين الاقتصادي ما أمكن ذلك. الغازات العادمة المنتجة أثناء الحرق يتم تمريرها خلال المسترجعات (Regenerators) ثم عندئذ تترك

إلى الجو خلال المدخنة. تبني المسترجعات أسفل الأفران. الغازات العادمة تمرر حرارتها الملموسة إلى المباني من الطوب للمسترجعات حتى ارتفاع درجة الحرارة إلى ١٠٠٠ م°، سريان غازات التسخين العادمة يتم عندئذ انعكاسها والغازات الداخلة (وقود غاز + هواء) المستخدمة في الحرق يتم تمريرها خلال بناء الطوب للمسترجعات التي تم تسخينها. لذلك فإن الغازات الداخلة يتم تسخينها المسبق قبل الدخول إلى المساحة الداخلية للحرق. بعد بعض الوقت يتم انعكاس تدفق الغازات مرة أخرى بحيث أن عادم غازات الحريق تقوم بتسخين بناء الطوب ثانياً. بذلك فإن المسترجعات تعمل بمبدأ دورات التسخين والتبريد. وهذا يتحقق بتغيير اتجاه سريان الغازات خلال المداخل الرأسية من وقت إلى آخر كل حوالي ٣٠ دقيقة.

يستمر تسخين الأفران حتى توقف تصاعد المواد المتطايرة تماماً. عملية الكربنة تتم طبقة بطبقة في شحنة الكوك بدءاً من حائطي الأجناب للفرن متحركاً نحو المركز. كربنة شحنة الفحم تستغرق حوالي ما بين ١١ - ١٨ ساعة. بعد تمام العملية يتم دفع الكوك الأحمر الساخن إلى الخارج بواسطة مكبس (كباس) كهربي. يسقط الكوك في عربة التبريد. إنتاجية الكوك هي حوالي ٧٥%.

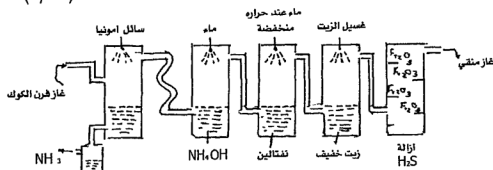
تبريد الكوك الأحمر الساخن يتم برش الماء (التبريد الرطب) أو بتمرير غازات خاملة من الغلايات (تبريد جاف). التبريد الجاف له مميزات تفوق التبريد الرطب لأن الكوك المنتج يكون أكثر كثافة وقوة. بالإضافة إلى أنه في حالة التبريد الرطب تفقد الحرارة الملموسة للكوك بينما في التبريد الجاف فإن الغازات الخاملة بعد تبريد الكوك تصبح ساخنة وعندئذ يتم تدويرها إلى الغلايات حيث يتم التسخين المسبق لمياه تغذية الغلاية ثم إعادة لتدوير لتبريد الشحنة الجديدة من الكوك.



شكل (١/٨) منتجات فرن الكوك لأوتوهوفان

٦- استعادة المنتجات الثانوية: (Recovery of by Products)

الغازات والأبخرة الصاعدة عند الكربنة في أفران الكوك لا يتم خلطها مع الحرق حيث يتم جمعها منفصلا. الغاز المعروف بخار فرن الكوك يتم معالجته مستقلا لاستعادة المنتجات الثانوية القيمة. أو لا يتم السماح للغاز الذي يكون عند درجة حرارة مرتفعة بعمل فقاعات (to bubble) خلال الماء في خط هيدروليكي رئيسي، الذي يعمل كعازل للماء ويمنع مرور الغازات ثانيا إلى المعوجة (retort) عند فتحها شكل (١/١٠).



شكل (١/٩) مخطط لوحدة معالجة غاز فرن الكوك

(١) استعادة القار (Recovery of tar)

يتم مرور الغاز من أفران الكوك خلال برج الذي يتم فيه رش سائل الأمونيا. يتم تجميع القار والغبار في الحوض. الحوض يتم تجهيزه بلفائف من المواسير للتسخين لاستعادة الأمونيا ثانيا. يتم استخدام الأمونيا ثانيا. قار الفحم (coal tar) مصدر ثمين للكيمويات. القار المنتج يتم تقطيره لإنتاج عدد من المنتجات مثل خام البنزول (crude benzol)، المركبات الفينولية، النافثا الثقيلة (heavy naphtha)، زيت الأنثرا كينون، أساس مذيب البيريدين الأولي (pyridine)....الخ.

(٢) استعادة الأمونيا: (recovery of ammonia)

يلبي ذلك، يتم عندئذ تمرير الغازات خلال برج حيث يتم رش المياه لاستعادة الأمونيا. يمكن كذلك إزالة الأمونيا بإذابتها في H_2SO_4 لتكوين $(NH_4)_2SO_4$ ، حيث يستخدم عندئذ كسماد. إزالة الأمونيا من الغاز ضروري وإلا فإنها يمكن أن تسبب انسداد في مواسير الغاز في شكل $(NH_4)_2CO_3$.

(٣) استعادة النفثالين: (recovery of naphthalene)

يتم تمرير الغازات خلال برج تبريد، حيث يتم رش مياه عند درجة حرارة منخفضة. يتم غسيل الغاز بالماء حتى انخفاض درجة حرارته. يحدث تكثف للنفثالين هنا حيث يتم جمعه مع الماء واستعادته.

(٤) استعادة البنزول (recovery of benzol)

(البنزول هو خام بنزين ذو خصائص مانعة للخط). لاستعادة البنزول يتم إدخال الغازات في زيت خفيف أو مغسلة (scrubber) للبنزول، حيث كلا من البنزين (C_6H_6) وأشباهه يتم إزالته ويتم جمعه عند القاع. زيت الغسيل مع أشباه البنزين يعرف بالزيت الخفيف (light oil). (الزيت الخفيف أخف من الماء ولذلك سمي بالزيت الخفيف). وهو خليط من الهيدروكربونات ذات درجة حرارة الغليان المنخفضة، والبنزين، أشباه البنزين والمذيب المستخدم في الغسيل. المذيب عبارة عن خليط من كل من المركبات الآتية (methy ethyl benzene, trimethyl benzene.etc) فصل المكونات

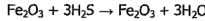
المختلفة للزيت الخفيف يتم بواسطة التقطير. المذيب يتم استعادة إلى وحدة الغسيل (scrubber).

(5) استعادة (H₂S):

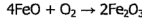
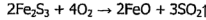
H₂S ومركبات الكبريت الأخرى يتم إزالتها من غاز فرن الكوك بعد فصل الزيت الخفيف.

مركبات الكبريت الموجودة في غاز الفحم يجب إزالتها لأن الكبريت وأكاسيد الكبريت SO₂، SO₃ تساعد في التآكل. أضف إلى ذلك أن H₂S له رائحة كريهة.

لإزالة الكبريت، H₂S الغاز، يتم تمرير الغاز خلال غرفة مملوءة (packed) بأكسيد الحديد (Fe₂O₃) الرطب، والذي يتفاعل مع H₂S لإعطاء (Fe₂S₃).



بعد بعض الوقت عند تحول كل Fe₂O₃ إلى Fe₂S₃، يتم تعريض المنقي (purifier) إلى الجو حيث يتأكسد Fe₂S₃ إلى الأكسيد.



SO₂ الناتج يمكن استخدامه في صناعة حامض الكبريتيك والذي يمكن استخدامه في امتصاص NH₃ من غاز الفحم. غاز فرن الكوك المنقي يتم أخيراً تخزينه فوق الماء في مستودع حامل للغاز (holder). وهو يستخدم غالباً كوقود منزلي حيث يكون سعر الفحم رخيص. المكونات الرئيسية لغاز الفحم أو غاز فرن الكوك هي CH₄، H₂ مع نسبة قليلة من CO₂، CO، N₂، O₂.

الفصل الثالث

3

الوقود السائل Liquid Fuels

الوقود السائل يستخدم حالياً على نطاق واسع في المجالات الصناعية والمنزلية. أهمية الوقود السائل يتم إدراكها من حقيقة أن محركات الاحتراق الداخلي تستخدمه. استخدام الوقود السائل في أفران توليد الحرارة زاد بمعدل كبير. أكبر مصدر للوقود السائل هو البترول. القيمة الحرارية للبترول هي حوالي ٤٠٠٠ كيلو جول/ الكيلوجرام. رغم أن البترول يمثل الجزء الكبير من الوقود السائل، إلا أن المصادر الأخرى تساعد في الإمداد بالوقود السائل مثل قار الفحم، البنزول الخام (crude benzol)، الوقود السائل المخلوق من الفحم...الخ.

١-البترول:

كلمة بترول تعني "زيت الصخر - rock oil" في اللغة اللاتينية petra تعني الصخر، oleum تعني الزيت. وهو يسمى كذلك الزيت المعدني (mineral oil). البترول خليط معقد من الهيدروكربونات البارافينية والأولييفينية والأروماتية (paraffinic, olefenic, aromatic) مع محتوى بكميات صغيرة من المركبات العضوية.

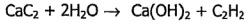
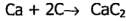
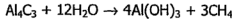
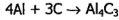
أ- أصل البترول:

هناك العديد من النظريات لشرح أصل البترول، وسيتم مناقشة بعض من هذه

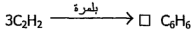
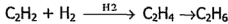
النظريات.

نظرية مندليف:

طبقاً لنظرية مندليف (١٨٧٦) في أن البترول هو من أصول غير عضوية، وهو تكون بفعل أداء الماء على الكرييدات المعدنية (metallic carbides). الكرييدات المعدنية تكونت بتفاعل المعدن مع الكربون تحت ظروف درجة الحرارة المرتفعة والضغط المرتفع داخل الأرض.



الهيدروكربونات التي تكونت بهذا الشكل يمكن أن يحدث لها هدرجة أو بلمرة لتكوين أنواع مختلفة من الهيدروكربونات.



لذلك، ينتج خليط من البارافينات، الأولوفينات، الأروماتيك. هذه النظرية أيدتها مواسون الذي ادعى تحضير سائل يشبه ذلك للبترول، بفعل الماء على كربيد اليورانسيوم. ولكن هذه النظرية فشلت في شرح وجود مركبات النيتروجين والكبريت، المركبات ذات النشاط البصري... الخ في البترول.

نظرية إنجلر:

طبقاً لهذه النظرية يكون البترول من أصل عضوي. فهي تقترح أن البترول يتكون بالتقطير الإتلافي للحيوانات البحرية الميتة، والحيوانات الميتة.... الخ، داخل الأرض تحت الضغط العالي ودرجة الحرارة العالية. حطام الحيوان يمكن أن تكون قد تحللت بفعل البكتريا اللاهوائية تحت هذه الظروف. إنجلر كان قادراً على تحضير

منتج مشابه للبترول محتويا على مركبات النيتروجين والكبريت وكذلك المركبات ذات النشاط البصري بالنقطير الإتلافي لزيت السمك. وجود الماء المالح مع البترول يؤيد هذه النظرية. ولكن، هذه النظرية لم توفق في شرح وجود الكلوروفيل (الموجود في النبات) في البترول.

النظرية الحديثة:

طبقا لهذه النظرية، فقد اقترح أن البترول يتكون بسبب تحلل النباتات وكذلك الحيوانات الميتة. المادة العضوية الميتة من النبات أو الحيوان التي ترسب إلى قاع البحر الضحل والبحيرات والبرك. هذه المخلفات التي ترسب تتحلل بواسطة البكتريا اللاهوائية. معظم المركبات العضوية يتم تدميرها وفقدانها. الزيوت الدهنية الغير مشبعة والأحماض التي تساعد على حياة البكتريا يحدث لها بلمرة. هذه تدفن تحت غطاء من الصخر حيث البكتريا تسبب لهم التحلل. في هذه العملية، المحتوى من الماء يقل من ٧٠% إلى ١٠% أو أقل نتيجة استمرار التحلل بفعل البكتريا، تحدث عمليات مختلفة من (Decarboxylation) حيث تحول المواد العضوية إلى البترول.

النظرية الحديثة تشرح وجود مركبات النيتروجين والكبريت. وجود الكلوروفيل والهيموجلوبين في البترول يتضح بحقيقة أن مصدر الكلوروفيل هو النبات وأن مصدر الهيموجلوبين الموجود في البترول هو الحيوانات البحرية. النظرية كذلك تشرح وجود المركبات ذات النشاط النظري. وجود الماء المالح والفحم قريبا من البترول يؤكد كذلك صحة النظرية الحديثة.

٢- مكونات البترول:

البترول الخام من مختلف الأماكن له مكونات تختلف خلال مجال ضيق. التحليل الكلية أظهرت أن متوسط مكونات البترول هي من العناصر الآتية:

العنصر	C	H ₂	S	O ₂	N ₂
النسبة المئوية	٨٠ - ٨٧	١١.١ - ١٥	٠.١ - ٣.٥	٠.١ - ٠.٩	٠.٤ - ٠.٩

رماد البترول الخام هو فقط ٠.١% أو أقل. عمليا وجدت جميع المعادن في رماد البترول. أكثر المعادن الموجودة تشمل الحديد والألمنيوم والكالسيوم المغنسيوم والنيكل بالإضافة إلى عنصري السيليكون والصوديوم.

البترول الخام هو أساسا خليط من مختلف الهيدروكربونات. معظم الهيدروكربونات هي ذات التسلسل المستقيم أي (straight chain) من الهيدروكربونات البارافينية وكذلك الأروماتية مثل البنزين، التولوين والنفثالين... الخ. الألوفينات والأسيتيلينات (acetylenes) غير موجودة في الزيت الخام. ولكن أثناء تصنيع البترول تتكون الأولوفينات.

الكبريت يوجد في شكل مشتقات الهيدروكربونات مثل (alkylsulphides)، (aromatic sulphides).... الخ. النيتروجين موجود في شكل مشتقات (Pyridine)، (Quinoline)، (Pyrrole).... الخ. الأكسجين المتحد يوجد في شكل أحماض الكربوكسيليك (carboxylic) مثل (naphthalenic acids)، الكيتونز والفينولات. الرائحة المنفردة للبترول الخام ترجع إلى وجود مركبات الكبريت فيه.

تقسيمات البترول الخام:

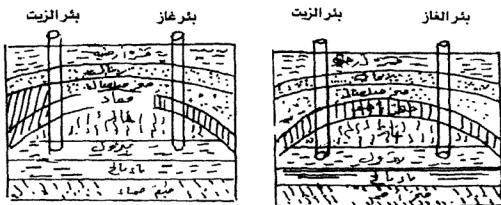
النسبة التي توجد بها الهيدروكربونات من البارافينات، الألوفينات والأروماتيك في البترول تختلف من مكان إلى آخر حيث تم استخراج البترول. على أساس المتبقي الذي يوجد بعد التقطير فإن البترول الخام يمكن تقسيمه كما في الجدول التالي.

جدول () تقسيم أنواع البترول الخام

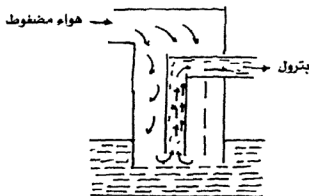
ملاحظات	المحتويات	الاسم	متخلفات بعد التقطير
يوفر رقم أوكتيني منخفض وجازولين يسيل في مسار ضيق strait run gasoline	هيدروكربونات تسلسل مستقيم وكميات قليلة من النفثالين والهيدروكربونات الأيلافاتية	بارافين الأساس	شمع البارافين
يوفر رقم أكتين عالي وجازولين يسيل بسهولة	هيدروكربونات أروماتية ونفثالينيك cycloparraffines	أسفلت الأساس	الأسفلت
يوفر جازولين متوسط الدرجة نم السيول في المسار الضيق	بارافينات، نفثينات و هيدروكربونات أروماتية	ذو أساس مختلط	شمع بارافين وأسفلت

تصنيع الزيت الخام: شكل (١/١٠) ، شكل (١/١١)

يوجد البترول على عمق أسفل القشرة الأرضية. يوجد الزيت طافي فوق الماء المالح أو الماء شديد الملوحة (brine) عموماً، يحدث تراكم للغاز الطبيعي فوق الزيت. لرفع الزيت إلى السطح (استخراج الزيت) يتم حفر آبار وإدخال مواسير مستقيمة حتى الصخور الحاملة للزيت. طبيعي أو يندفع الزيت إلى الخارج خلال هذه الفتحات بسبب ضغط الغاز الطبيعي. ولكن مع انخفاض ضغط الغاز الطبيعي يتم ضخ الزيت. باستخدام طلمبة الرفع الهوائي. طلمبة الرفع الهواء تتكون من ماسورتين متحدي المركز، يتم إنزالهم إلى طبقة الزيت. يتم دفع الهواء المضغوط خلال الماسورة الخارجية حيث يتدفق الزيت من الماسورة الداخلية.



شكل (١/١٠) الضخ الميكانيكي للبترول



شكل (١/١١) ضخ البترول

تكرير البترول: (Refining of Petroleum) أشكال (١٢، ١٣، ١/١٤)

الزيت الخام الذي يصل إلى سطح الأرض، يتكون عموماً من خليط من المواد الهيدروكربونية الصلبة والسائلة والغازية المحتوية على الرمل والماء. الزيت الخام بهذه الحالة يكون ذو أهمية متدنية. لذلك، فإنه بعد إزالة ما به من الأوساخ والماء وكثيراً من الغاز الطبيعي المصاحب، فإنه يتم فصل الزيت الخام إلى عدد من الأجزاء المفيدة بالتقطير الجزئي (fractional distillation). الأجزاء الناتجة من عملية التقطير الجزئي يتم عندئذ إما تعرضها لعمليات التنقية أو للعمليات التحويلية، وذلك لصناعة

المنتجات المفيدة المختلفة من البترول. كل هذه العمليات تسمى تكرير البترول والمصنع الذي يقوم بهذا العمل يسمى مصنع التكرير.

تكرير البترول يشمل الخطوات التالية:

إزالة الاستحلاب (demulsification)

الزيت الخام المنتج من البئر يكون في شكل مستحلب ثابت من الزيت والماء المالح، والذي يكون بلون ما بين الأصفر إلى البني الداكن. عملية تثبيت المستحلبات ترجع إلى وجود عوامل الاستحلاب في زيت البترول (مثل، أملاح الصوديوم لأحماض النفثينيك ، naphthenic acids ، sulfo.... الخ. كذلك المستحلبات تكون ثابتة بسبب الكهرباء الاستاتيكية على الحبيبات المنتشرة مسببة تناثر طبيعي.

يتم إزالة الاستحلاب بعملية (cotterll's process) حيث في هذه العملية يتم إزالة الماء من الزيت بعملية كهربية. يتم تعريض الزيت الخام إلى مجال كهربي، وعند تصادم نقاط الماء الغروي (colloidal water) حيث تتكون نقاط كبيرة والتي تنفصل من الزيت.

إزالة الملوثات الضارة:

زيادة المحتوى من الأملاح مثل NaCl ، MgCl_2 يمكن أن يسبب تآكل معدات التكرير، هذه يتم إزالتها بالماء. مركبات الكبريت المنفرة تزال بمعالجة الزيت بأكسيد النحاس. كبريتيد الحديد (copper sulfide) الذي يتكون يتم فصله بالترشيح.

التقطير الجزئي (fractional distillation)

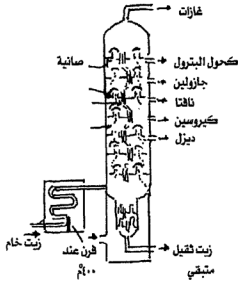
التقطير الجزئي للبترول يتم في برج التقطير العالي بتصميم خاص والمصنع من الصلب. عمليات التقطير الأولى كانت غير مستمرة (Batch processes). في هذه العمليات الغير مستمرة كان التقطير لزيت البترول يتم من أوعية ضخمة حتى يتم فصل معظم الزيت إلى أجزاء. ولكن ألغيت هذه الآن وذلك بسبب زيادة درجة حرارة التشغيل، حيث يحدث تكسير لمختلف الأجزاء. في معامل التكرير الحديثة استبدلت

العملية الغير مستمرة للتكرير بالعملية المستمرة.

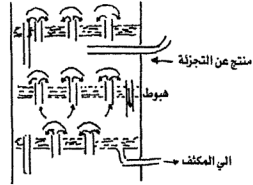
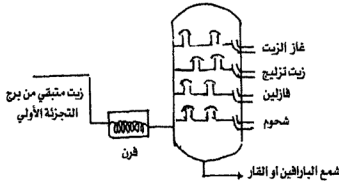
في العملية المستمرة (continuous process):

يتم تسخين الزيت الخام إلى ٣٥٠ - ٣٨٠ °م في فرن أنبوبي بتصميم خاص يسمى المقطر الأنبوبي (pipe still). يتم المحافظة على درجة الحرارة خلال المجال السابق وذلك لتجنب التحلل الحراري للمكونات العالية إلى المنخفضة. يتم تمرير الأبخرة الساخنة من الخام خلال برج التجزئة الطويل والذي يسمى برج الفقاعة (Bubble tower). يتكون هذا البرج من عدد من الصواني الأفقية المزودة بعدد من المداخل الصغيرة التي ترتفع الأبخرة من خلالها. هذه المداخل الصغيرة تكون مغطاة بعدد من الأغشية المتحركة (loose caps) والتي تعرف بأغشية الفقاعة (bubble caps). أغشية الفقاعة هذه تساعد في توفير الالتصاق الجيد بين الأبخرة الصاعدة والسوائل المتحركة إلى أسفل.

فصل الأجزاء المختلفة مبني على حقيقة أن الهيدروكربونات في زيت البترول تغلي عند درجات حرارة مختلفة. درجة الحرارة في برج. التجزئة تنخفض بالتدرج عند التحرك إلى أعلى (حوالي ٣٠٠ °م عند القاع وتنخفض بالتدرج حتى ١٢٥ °م عند قمة برج التجزئة). مع تصاعد أبخرة الزيت الخام إلى أعلى فإن تصبح أكثر برودة بالتدرج ويحدث تكثف جزئي عند ارتفاعات مختلفة من برج التقطير. الأجزاء ذات درجة حرارة غليان أعلى تتكثف أولاً عند الصواني السفلية بينما الأقسام ذات درجة حرارة غليان منخفضة تتكثف على مراحل عند الصواني العليا. لذلك، فإنه يتم فصل الزيت الخام إلى أجزاء مختلفة طبقاً لمجال غليانها ويتم جمعها عند ارتفاعات مختلفة في البرج بمساعدة المكثفات. المتبقي في قاع برج التجزئة يتم تقطيره تحت التفريغ لاستعادة أجزاء مختلفة.



شكل (١/١٣) التقطير الجزئي للبترول الخام

شكل (١/١٢) مخطط مبسط للتجهيز
بغطاء الفقاعة

شكل (١/١٤) التقطير بالتفريغ للزيت المتبقي

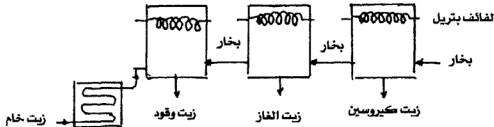
جدول () الأجزاء المنتجة بالتقطير الجزئي لخام البترول

القسم	الغليان	مجال المكونات	الاستخدامات
١- غازات وقود غير مكثفة	$> 30^{\circ} \text{م}$	C_4-C_1	وقود منزلي، صناعيات الكيماويات العضوية
٢- إيثربترول متطاير	$30 - 70^{\circ} \text{م}$	C_7-C_5	مذيب للدهون والزيوت الأساسية

القسم	الغليان	مجال المكونات	الاستخدامات
			يستخدم في التنظيف الجاف
٣- الجازولين (بنزين)	٤٠ - ١٢٠ °م	C ₉ -C ₅	وقود لمحركات الاحتراق الداخلي ومذيب، للتنظيف الجاف
٤- النافثا أو المذيب الكحولي	١٢٠ - ١٨٠ °م	C ₁₀ -C ₉	كمذيب، للنظافة الجافة. خام للصناعات البتروكيميائية
٥- زيت الكيروسين	١٨٠ - ٢٥٠ °م	C ₁₆ -C ₁₀	الاضاءة، وقود لمواقد السولار لعمل غاز الوقود، الجزء المتطاير اكثر كوقود بئق (jet fuel)
٦- زيت الديزل	٢٥٠ - ٣٢٠ °م	C ₁₈ -C ₁₀	وقود محركات الديزل، كربنة غاز الماء
٧- الزيت الثقيل	٣٢٠ - ٤٠٠ °م	C ₃₀ -C ₁₇	وقود للسفن، الأفران الميتالرجية، خام لعمليات التكسير
عند التقطير بالتفريغ ينتج الزيت الثقيل *زيت التزليج *هلام البترول *الشحوم		C ₂₀ - C ₁₇	زيت تزليج الفازلين وهو يستخدم في صناعة مستحضرا التجميل والمستحضرات الطبية
			كمواد تزليج
*شمع البارافين		C ₂₈ - C ₂₀	يستخدم لتحضير الشموع، الورق الشمعي، طلاء الأحذية، العزل الكهربائي
٨- المتبقي قد يكون من	< ٤٠٠ °م		لرصف الطرق وعزل

القسم	الغليان	مجال المكونات	الاستخدامات
نوعين			الأسقف
*الأسفلت للخام الأسفلتي			كوقود، لقولية أعمدة
*كوك البترول			الأقطاب

يوجد نوع آخر من التقطير الجزئي يسمى الوميض العلوي (Top flashing). في هذه العملية، يتم تسخين الزيت الخام في فرن ثم مرور الأبخرة خلال أبراج تجزئة مختلفة التي تكون ثابتة عند درجات حرارة مختلفة، لجمع الأجزاء المختلفة. يستمر المحافظة على درجة الحرارة باستخدام لفات من مواسير التبريد. فمثلاً، في حالة مرور الزيت الخام خلال البرج الأول، فإن درجة حرارته تظل بحيث يتكثف زيت الوقود عند القاع وبخار المكونات الأخرى تمر إلى البرج التالي، في البرج التالي يستمر كذلك المحافظة على درجة الحرارة بحيث تتكثف أبخرة غاز للزيت عند القاع وهكذا. يتم حقن البخار عند قاع كل برج تجزئة لتأثير ضغطه الجزئي. أبخرة الجازولين أخيراً تمر إلى الخارج من القمة شكل (١/١٥).



شكل (١/١٥) الوميض العادي

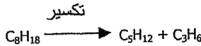
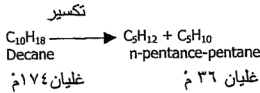
التكسير : (cracking)

من بين جميع الأجزاء الناتجة من التقطير الجزئي للبترول الخام، فإن الجازولين (بنزين العربات) يعتبر الأكثر أهمية من بين هذه الأجزاء. مع النمو السريع في صناعة السيارات زاد استهلاك وقود الجازولين أضعافاً، ولكن إنتاجية هذا الجزء

من الزيت الخام هي فقط ٢٠%. كذلك فإن نوعية الجازولين المنتج ليست جيدة. هذا الجازولين يسمى الجازولين سهل الانسياب في الأنابيب (straight run gasoline). على الجانب الآخر، فإن إنتاج الأجزاء البترولية الأثقل مرتفع إلى حد ما. لذلك، أصبح من الضروري تحقيق أفضل استفادة من هذه الأجزاء الثقيلة، بتحويلها إلى أجزاء مفيدة، مثل الجازولين. يتم ذلك بتقنية تسمى التكسير (cracking).

عملية التكسير:

عملية التكسير هذه يتم بها تحويل الأجزاء الثقيلة إلى أجزاء أخف باستخدام الحرارة، باستخدام أو بدون استخدام عامل وسيط (catalyst). التكسير يشمل تمزيق أربطة C-C ، H-C في سلسلة الهيدروكربونات ذات الوزن الجزيئي العالي. مثل:



تقريبا ٥٠% من الجازولين الحالي يتم إنتاجه بالتكسير. يجب التأكيد هنا أن الجازولين المنتج بالتكسير يتفوق كثيرا على البنزين المنتج من برج التقطير مباشرة عملية التكسير تتضمن التغيرات الكيميائية الآتية:

- تحويل الهيدروكربونات الأولى إلى الأدنى أي انقسام الرباط C-C. المنتجات التي يتم الحصول عليها لها درجة حرارة غليان أقل من المادة الأولية.
- تكوين هيدروكربونات ذات سلاسل بفرعات (Branched Chain) من الألكينات (Alkanes) ذات التسلسل المستقيم.
- الهيدروكربونات الغير مشبعة تتكون من الهيدروكربونات المشبعة.
- يمكن أن يحدث تبلر (crystallization)

ولكن، رغم أن الاستخدام الرئيسي للتكسير التجاري هو لإنتاج الجازولين، إلا أنه يستخدم كذلك لإنتاج الأولفينات من النافثا (olefins from naphthas)، غاز الزيت من الكيروسين وخفض لزوجة المتبقي سهل الانسياب (straight run).
التكسير يمكن أن يتم بطريقتين وهما:

(١) التكسير الحراري (thermal cracking)

عند حدوث التكسير ببساطة باستخدام الحرارة والضغط، فإن هذه العملية تسمى التكسير الحراري. الزيوت الثقيلة يتم تعريضها إلى درجة حرارة عالية وضغط مرتفع، عند تكسر الهيدروكربونات العالية لإنتاج جزيئات البارافينات والأولوفينات....الخ. الثبات الحراري بين مكونات أجزاء البترول يزداد حيث البارافينات أقل من النفثينز (naphthenes) أي (alcyclics - المركبات الدهنية الحلقية)، أقل من المركبات الأروماتية (aromatics). المنتجات التي يتم الحصول عليها تتوقف على ظروف التشغيل. التكسير الحراري يمكن أن يتم إما في المجال السائل أو في المجال الغازي.

أ- التكسير الحراري في المجال السائل:

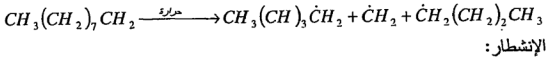
بهذه الطريقة فإنه يمكن تكسير أي نوع من الزيت المتبقي أو زيت ثقيل. يتم المحافظة على الشحنة في الحالة السائلة وذلك باستخدام ضغط مرتفع في المجال من ٣٠ كجرام/سم^٢ إلى ١٠٠٠ كجرام/سم^٢ عند درجة حرارة مناسبة ٤٧٦ - ٥٣٠ °م. المنتجات التي تم تكسيرها يتم فصلها في برج التجزئة. الأجزاء الهامة هي، جازولين التكسير (٣٠ - ٣٥%) غازات التكسير (١٠ - ٤٥%)، زيت وقود التكسير (المازوت) (٥٠ - ٥٥%). جازولين التكسير له رقم أوكتين حوالي ٧٠. غازات التكسير تحتوي على مواد خام للبتروكيماويات. مخلفات التكسير تستخدم كوقود.

ب- التكسير الحراري في المجال الغازي:

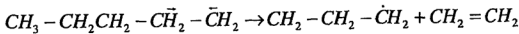
بهذه الطريقة يمكن فقط تكسير الزيوت التي يمكن تبخيرها عند درجات الحرارة المنخفضة. أجزاء البترول ذات مجال الغليان المنخفض مثل الكيروسين، يتم تسخينها إلى درجة حرارة من ٦٧٠ - ٧٢٠ °م عند ضغط منخفض من ١٠ - ٢٠ كجرام/سم^٢. الوقت اللازم للتكسير في هذه العملية أقل كثيرا مقارنة بالتكسير الحراري في المجال السائل. الجازولين (بنزين السيارات) المنتج من تكسير المجال الغازي له خواص مانع الخبط (antiknock) أفضل ولكن أضعف بالنسبة للثبات. عموما التكسير الحراري ينتج جازولين أقل استقرارا وثباتا عن جازولين المنتج من برج تقطير الخام (straight run) بسبب وجود هيدروكربونات عالية غير مشبعة نشطة فيها.

آلية التكسير الحراري:

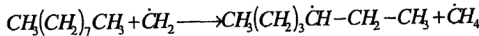
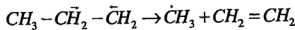
التكسير الحراري يعتقد أنه يتبع آلية الشق الحر (Free Radical). يمكن تمثيل الآلية بتنشيط (n-nonane).



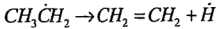
الشق الحر المتكون يكون غير ثابت حراريا ويحدث له انقسام عند (B-position) ينتج شق جديد و أولوفين.



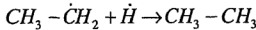
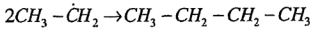
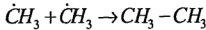
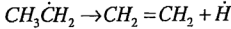
يستمر الانقسام، حتى تكون شق ثابت حراريا.



الشق الذي ليس له رباط C-C في الموقع B بسبب وجود شق الهيدروجين الحر.



أخيرا



التكسير بالتحفيز : (catalytic cracking)

التكسير بالتحفيز أو بعامل وسيط حيث يتم التكسير عند درجة حرارة وضغط أقل كثيرا. العامل الوسيط المستخدم هو عادة خليط من السيليكا والألومينا (سيليكات الألومنيوم المائية). العامل الوسيط الذي يزداد استخدامه حديثا هو الزيوليت (zeolite). نوعية وكمية الجازولين المنتج بالتكسير بعامل وسيط أفضل كثيرا.

يتميز التكسير بالعامل الوسيط عن التكسير الحراري بالميزات الآتية:

١. في وجود العامل الوسيط لا توجد حاجة لدرجة الحرارة العالية أو الضغط

العالي وهذا يحقق خفض في التكاليف.

٢. استخدام العامل الوسيط لا يعجل فقط التفاعلات (تحلل، إزالة الهيدروجين،

والأيزميرات والتي تماثل التركيب الكيماوي ولكن تختلف في لخواص

الكيميائية (isomerization) و البلمرة)، ولكن إدخال تفاعلات جديدة كذلك والتي

تطور إلى حد كبير إنتاجية وطبيعة المنتجات.

٣. إنتاج الجازولين أعلى. حوالي ٧٠% من المادة الخام تتحول إلى الجازولين.

٤. الجازولين المنتج بواسطة التكسير باستخدام الحافز الوسيط يحتوي على نسبة قليلة من الأولوفينات (olefins) ونسبة عالية من (isoparaffins) و الهيدروكربونات الأروماتية. هذه تزيد خاصية عدم الخبط للجازولين. الجازولين الذي يتكون بالتكسير باستخدام العامل الوسيط له رقم أوكتين ٨٠

٥. غير مطلوب أي وقود خارجي بالتكسير، ذلك لأن الحرارة المطلوبة يتم الحصول عليها بحرق الكوك المرسب على العامل الوسيط نفسه، أثناء عملية التشطيط.

٦. يمكن تحكم أفضل في العملية أفضل من العملية الحرارية، وبذا يمكن الحصول على المنتجات المطلوبة.

٧. المنتج يحتوي كمية صغيرة جدا من الكبريت الغير مرغوب فيه لأن معظمه يهرب في شكل غاز H₂S أثناء التكسير.

٨. الجازولين المنتج يحتوي على أقل القليل من الصمغ ومن المركبات المكونة للصمغ.

٩. مقارنة بالتكسير الحراري، فإن التكسير بالعامل الوسيط ينتج كوك أقل وغاز أقل وزيادة في المنتجات السائلة.

١٠. العوامل الوسيطة هي ذات طبيعة اختيارية (selective) في عملها ولذلك يحدث التكسير فقط للأجزاء ذات درجة حرارة الغليان المرتفعة.

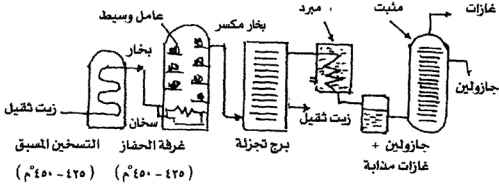
١١. تساعد الغاز المصاحب يمكن خفضه، بما يزيد من إنتاجية الجازولين.

١٢. المواد المكونة للكوك يتم امتصاصها بواسطة العوامل الوسيطة بمجرد تكوينها.

طبقا لطريقة استخدام العامل الوسيط، فإن التكسير بالعامل الوسيط يكون من نوعين وهما:

التكسير بطبقة العامل الوسيط الثابتة: (fixed bed)

في هذا النوع من التكسير يكون العامل الوسيط في شكل حبيبات أو كرات. هذه الحبيبات أو الكرات تستخدم في شكل طبقات ثابتة في أبراج العامل الوسيط. شكل (١/١٦)



شكل (١/١٦) التكسير بالعامل الوسيط بالطبقة المثبتة

شحنة الزيت الثقيل يتم تمريرها خلال سخان وتسخينها إلى درجة حرارة التكسير (٤٢٠°م - ٤٥٠°م). عندئذ يتم مرور الشحنة خلال غرفة العامل الوسيط. العامل الوسيط المستخدم يكون إما هلام السيليكا الألومينا ($\text{Gel SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$)، أو البوكسيت المخلوط بالطفل وأكسيد الزركونيوم. برج العامل الوسيط يظل كذلك عند ٤٢٠ - ٤٥٠°م وعند ضغط من ١ - ٥ كجرام/سم^٢. تكسير أبخرة الزيت الثقيل يحدث في غرفة العامل الوسيط وحوالي ٣٠ - ٤٠% من الشحنة يتحول إلى هيدروكربونات ذات الوزن الجزيئي المنخفض. الكربون المتكون أثناء عملية التكسير (حوالي ٤%) يمتص على العامل الوسيط بما يسبب عدم تنشيطه. يتم تمرير الأبخرة التي تم تكسيرها خلال برج التجزئة، حيث يتم استعادة أبخرة الجازولين من أعلى والزيوت الثقيلة يحدث لها تكثيف عند القاع. يتم تعريض أبخرة الجازولين إلى مبرد حيث يحدث تكثف للجازولين مع بعض المنتجات الغازية الأخرى. بعد ذلك يرسل الجازولين إلى المثبت (stabilizer)، حيث الغازات المذابة يتم إزالتها من القمة ويتم الحصول على الجازولين

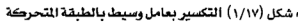
النقي الذي له مجال الغليان المطلوب شكل (١/١٦).

أثناء العملية، يتوقف العامل الوسيط عن العمل بعد حوالي ١٠ - ١١ ساعة، بسبب ترسيب حبيبات الكربون المتكونة أثناء عملية التكسير. وهذا يعاد تنشيطه بحرق الكربون في تيار من الهواء الساخن. أثناء إعادة تنشيط العامل الوسيط فإن أبخرة الزيت الثقيل يتم تحويلها خلال برج آخر بغرفة عامل وسيط أو أن التفاعل يتقدم باستمرار.

نظرا لأن تفاعلات التكسير هي تفاعلات ماصة للحرارة (Endothermic)، فإن درجة الحرارة في غرفة العامل الوسيط يتم المحافظة عليها بتدوير ملح مصهور (خليط من نترات الصوديوم ونيترت الصوديوم) في مواسير تمر خلال طبقة العامل الوسيط.

التكسير الحراري بطبقة العامل الوسيط المتحركة:

هذا معروف كذلك بالتكسير بعامل وسيط بطبقة العامل الوسيط المائعة (fluid bed). في هذا النوع من التكسير، يكون العامل الوسيط في شكل مسحوق دقيق الذي يتدفق إلى أسفل إلى غرفة التكسير، خلال قادوس. يتم خلط العامل الوسيط بأبخرة الزيت الثقيل ويسلك مثل طبقة المائع الذي يمكن تدويره في تدفق مسارات الغاز. محطة الطبقة المائعة أو طبقة العامل الوسيط المتحركة للتكسير تتكون من مفاعل ومنشط مجهزين جنباً إلى جنب شكل (١/١٧).



٨٩

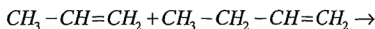
بالمرور، مع احتجاز حبيبات العامل الوسيط. الحرارة المنطلقة أثناء عملية التنشيط تستخدم في التسخين المسبق للعامل الوسيط.

الجازولين المخلوق (synthetic petrol)

كميات كبيرة من الجازولين يتم توفيرها من عمليات التكسير والتقطير. ولكن لزيادة الطلب على الجازولين كان من الضروري تخليقه من مصادر أخرى. الطرق الرئيسية لتخليق الجازولين هي:

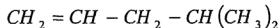
البلمرات: (polymerization)

يقصد بالبلمرة إنتاج الجازولين المتميز، البلمرة هي عملية متممة لعملية التكسير بالعامل الوسيط. أثناء التكسير يتم الحصول على منتجات ثانوية من الأولوفينز والهيدروكربونات الغير مشبعة، مثل الإيثين (Ethene)، البروبين، البيوتين. عند تعرض هذه الغازات إلى ضغط عالي ودرجة حرارة مرتفعة في وجود عامل وسيط، فإنه يحدث لها البلمرة لتكون هيدروكربونات أعلى، تشبه الجازولين.



Propene

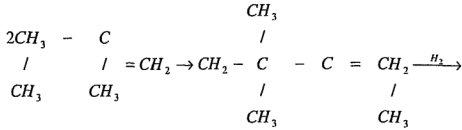
1- Butene



5-Methylhexene

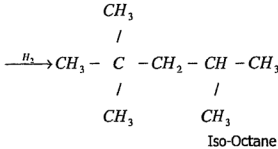
الجازولين المنتج يسمى الجازولين البوليمر. وله رقم أكتين جيد (٧٨ إلى ٨٣).

بالمثل عند مرور غازات التكسير (cracked gases) في حامض كبريتيك بتركيز ٧٠% عند ١٠ - ٢٠ °م فإنه تحدث بلمرة لجزيئين من الإيزوبوتين، تاركا الأوليفينات الأخرى والتي لم تتأثر. يتم هدرجة (di-isobutylene) فوق النيكل كعامل وسيط عند ضغط ودرجة حرارة ١٦٠ °م لإنتاج أيزوأوكتين (iso octane). الأيزوأوكتين في الشكل النقي له رقم أوكتين ١٠٠.



أيزوبوتين

داي أيزوبوتيلين



البلمرة يمكن أن تتم بطريقتين وهما:

البلمرة الحرارية: (thermal polymerization)

وهذه تتم بتعريض غازات التكسير إلى درجة حرارة ٥٠٠ - ٦٠٠ °م وضغط ٧٠ - ٣٥٠ كجرام/سم^٢. المنتجات التي تتكون هي الجازولين وزيت الغاز (السولار وزيت الديزل) حيث يتم فصلهم بالتقطير الجزئي.

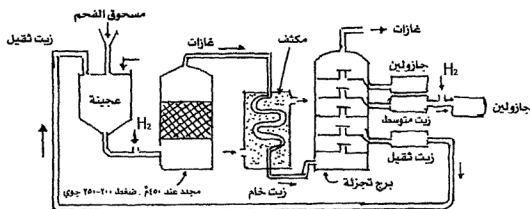
البلمرة بالعامل الوسيط: (catalytic polymerization)

تتم البلمرة في وجود عامل وسيط وهو حامض الفوسفوريك، حامض الكبريتيك.... الخ. معدل تفاعل البلمرة يزداد في وجود العامل الوسيط وتتم العملية عند درجة حرارة منخفضة (١٥٠ - ٢٠٠ °م). بعض من الروابط بين الجزيئات الذي لا يتم بالبلمرة الحرارية يمكن أن يتم بالبلمرة بين الجزيئات باستخدام العامل الوسيط.

طريقة بير جيس (bergivs process) شكل (١/١٨)

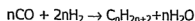
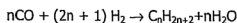
إنتاج الجازولين بالهدرجة الإتلافية للفحم تم تتميتها في ألمانيا بواسطة إنتاج الجازولين بالهدرجة الإتلافية للفحم تم تتميتها في ألمانيا بواسطة بيرجيس. العملية تتضمن تحويل الفحم من النوع المتدني مثل الفحم البني أو البيتوميني إلى سائل ووقود غازي بهدرجتهم في وجود عامل وسيط.

يتم خليط مسحوق الفحم من النوع المتدني مع زيت عالي الكثافة (Heavy oil) وعامل وسيط. العامل الوسيط المستخدم هو مركب من الحديد والقصدير، والمولبدنيوم. العجينة التي يتم الحصول عليها بالخلط يتم تسخينها بالهدروجين عند ٤٥٠ - ٤٩٠ °م عند ضغط ٢٠٠ جوي لمدة ساعتين. يتحد الهيدروجين مع الفحم ليكون هيدروكربونات مشبعة، والتي تنتج سائل من الهيدروكربون ذو درجة حرارة غليان منخفضة تحت ظروف درجة الحرارة العالية والضغط العالي (تكسير). الأبخرة التي تترك المحلول بالعامل الوسيط (catalytic convertor) يتم تمريرها خلال مبرد حيث يتم الحصول على سائل يشبه البترول الخام. يتم تعريض هذا البترول الخام المنتج إلى التقطير الجزئي لإنتاج (١)الجازولين، (٢) زيت متوسط (middle oil) (٣) زيت ثقيل. يتم هدرجة الثقيل المتوسط ثانيا في وجود عامل وسيط لإنتاج جازولين أكثر. يستخدم الزيت الثقيل ثانيا لعمل عجينة مع رماد الفحم الطازج. جزء الجازولين يحتوي ٧٤% بارافينات، ٢٢% مواد أروماتية، ٤% أوليفينز. طن واحد من الفحم وجد أنه ينتج ١٤٠ جالون من الجازولين. هدرجة الفحم ليست اقتصادية وتستخدمها الدول التي ليس لها موارد بترولية ولكنها غنية في موارد الفحم.

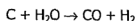


طريقة فيشر تروپش: (Fischer Tropsch Process) شكل (١/١٩)

تم تمييز هذه الطريقة بواسطة كلا من فيشر وترويش في ألمانيا عام ١٩٦٢ . فقد أثبتا أن خليط من غاز الماء النقي (وهو مزيج من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون النقي) والهيدروجين عند الضغط العادي ودرجة الحرارة من ٢٠٠ °م إلى ٣٠٠ °م في وجود عامل وسيط من الكوبالت أو الحديد، أنتج خليط من كل من (Alkanes, Alkenes). من هذا الخليط يمكن فصل جزء يشبه الجاولين بالنقطير الجزئي. طبيعة المنتج يتم تحديدها بدرجة الحرارة، الضغط وطبيعة العامل الوسيط.



غاز الماء اللازم للتفاعل السابق يتم الحصول عليه من الفحم. يتم أولاً تحويل الفحم إلى الكوك. يتم الحصول على غاز الماء بتفاعل البخار فوق الكوك الساخن الأحمر.



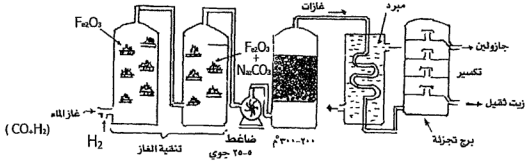
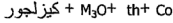
غاز الماء كوك ساخن

غاز الماء المخلوط بالهيدروجين يتم تمريره فوق Fe_2O_3 لإزالة الكبريت ومركباته. يتم بعد ذلك تنقية الخليط بالمرور فوق Fe_2O_3 المخلوط مع Na_2CO_3 لإزالة مركبات الكبريت العضوية. الغاز النقي يتم عندئذ إدخاله في محول العامل المساعد (catalytic converter) بعد ضغطه إلى ٥ - ٢٥ جوي. يتكون العامل الوسيط من الكوبالت (١٠٠ جزء)، الثوربا وهي أكسيد الثوريوم (٥ أجزاء) والماجيزيا وهي أكسيد المغنسيوم (٨ أجزاء) والكيزيلجر (kieselguhr) وهي تراب قاعي دياتومي (٢٠٠ جزء) ويستمر عند درجة حرارة ٢٠٠ - ٢٥٠ °م. نواتج التفاعل السائدة هي البارافينات والأولييفينات ذات التسلسل المستقيم (straight chain) .

التفاعلات التي تؤدي إلى تكون الهيدروكربونات كلها تفاعلات منتجة للحرارة (exothermic). الأبخرة الخارجة من غرفة التفاعل يتم مرورها خلال مبرد حيث يتم الحصول على سائل يشبه الزيت الخام. يتم تقطير وتجزئة الزيت الخام لإنتاج الجازولين المخلوق، زيت الديزل والزيت الثقيل. في طريقة فيشر وترويش الجازولين الذي يتكون يكون غنيا بالهيدروكربونات ذات التسلسل المستقيم وكذلك فإن رقم الأكتين للجازولين يكون فقط ٤٠ ولكن زيت الديزل المنتج يكون من نوعية ممتازة.

مما سبق يتضح أن التفاعل بين H_2 ، CO في وجود عامل وسيط هو أساس طريقة فيشر وترويش. ولكن نجاحها التجاري يتوقف إلى حد كبير على طريقة تحضير غاز الماء وتنقيته من الملوثات مثل الكبريت....الخ الذي يسبب التسمم للعامل الوسيط. حوالي ٨٠% من تكاليف التشغيل للعملية تستنفذ في تصنيع وتنقية الغاز المخلوق.

عامل وسط



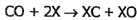
شكل (١/١٩) طريقة ترويش

(الآلية: mechanism)

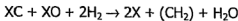
يعتقد أن التفاعل يشمل تكون كربيد المعدن (cobalt carbide). كربيد المعدن هذا عند الدرجة التالية يتقسم ليكون شق الميثيلين والكوبالت. شق الميثيلين يتبلر في وجود الهيدروجين ليكون (alkanes, alkenes) التسلسل المستقيم.

آلية التفاعلات يمكن تمثيلها كالآتي:

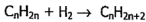
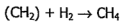
حيث x تمثل المعدن من العامل الوسيط.



(أكسيد المعدن) (كربيد المعدن)



ميثيلين



وجهات النظر الأخرى ترى أن العامل الوسيط يعمل أساسا خلال تكوين مركب معقد من المعدن من الأكسجين. كربيد المعدن يساهم فقط ١٠ - ١٥% من الهيدروكربونات المنتجة.

تنقية الجازولين (refining of gasoline)

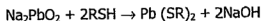
الجازولين المنتج من الزيت الخام أو بالعمليات التخليقية يحتوي على الأوليفينز (olefins) الغير مشبع والكبريت. وجود تلك المواد غير مرغوب فيه لأن:

- الأوليفينز يمكن أن تتأكسد وتتبلر بما يؤدي إلى تكون صموغ ورواسب عند التخزين. هذه ترسب على جدار المكربن (carburetor - الكرايبراتور) وتوقف المحرك.

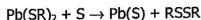
- مركبات الكبريت يمكن أن تؤدي إلى التآكل لمحركات الاحتراق الداخلي. مركبات الكبريت مثل الكحول الكبريتي (mercaptans) أو كبريتيد الهيدروجين لها رائحة منفرد كما يقال أنها تسبب تعفن للزيت (oil sour). لذلك، فإنه يلزم تنقية الجازولين قبل وصوله إلى المستهلك. إزالة تلك المركبات الغير مرغوب فيها يمكن تحقيقه بالطرق الكيميائية والطبيعية.

إزالة مركبات الكبريت:

الجازولين المحتوي على الكبريت يسمى الجازولين العفن (sourpetrol) . مركبات الكبريت يتم إزالتها بمعالجة الجازولين بواسطة مركب من الرصاص يسمى صوديوم بلمبييت مع إضافة محكمة من الكبريت.



Lead mercaptide



(Disulphide)

عملية تحويل الكبريت إلى (Disulphides) تسمى التحلية "Sweetening" ويعني بها إزالة الكبريت. حيث (PbS) الذي يتكون يتم إزالته بالترشيح. الداي سلفيد في الجازولين يتم استخلاصه بمذيب مناسب.

إزالة الأوليفينز : (Olefins)

الهيدروكربونات الغير مشبعة أو الأوليفينز يمكن إزالتها بمعالجة الجازولين بواسطة حامض الكبريتيك البارد بتركيز ٨٠%. وهذا لا يتفاعل مع البارافينات أو النفثينات أو الأروماتيك، ولكن يتفاعل مع المركبات الغير مشبعة مكونا كحولات وإيسترات (Esters) ويعمل على بلمرة تلك إلى مواد شبيهة بالقلار والتي يمكن إزالتها بالترشيح.

كذلك يمكن تنقية الجازولين بمروره خلال تراب القصار (Fuller's Earth) والذي يمكنه امتصاص الألوان وكذلك الأوليفينات.

الجازولين المنقي، عند التخزين يمكن أن تحدث له أكسدة بطيئة مسببة تكون الصمغ. يمكن إيقاف ذلك باستخدام المثبطات التي تعيق عمليات الأكسدة مثل الأمينوفينول والأروماتيك أمينز (Aminophenols and Aromatic Amines)

جدول () مقارنة بين جازولين التكرير، التفسير، البلمرة

جازولين التفسير	جازولين التكرير	جازولين التفسير لل خام
ينتج من المكونات ذات الوزن الجزيئي المنخفض	ينتج من الزيت الثقيل المكونات ذات الوزن الجزيئي العالي	ينتج من تقطير الزيت الخام يتم فصله طبيعيا من الخام
له أعلى رقم أكتين	له رقم أكتين عالي	له رقم أوكتين منخفض
يحتوي على الكثير من الهيدروكربونات ذات التسلسل المتشعب	يحتوي على كثير من الأروماتيك والنفثينز، الهيدروكربونات المتشعبة	يحتوي فقط على الألكينز العادي
مجال التكوين ضيق جدا من C ₉ -C ₇	مجال التكوين ضيق من C ₈ -C ₆	مجال التكوين متسع من C ₉ -C ₅

الخبيط: (knocking)

الوقود المستخدم في محركات الاحتراق الداخلي هو الجازولين أو الديزل. في محركات الاحتراق الداخلي، خليط من الوقود (الجازولين أو الديزل) يتم حرقه في الاسطوانة (السيلندر). يتم الحرق بواسطة شرارة كهربائية (في محركات البنزين) أو بضغط الهواء (في محركات الديزل).

الغاز الناتج أثناء الحرق، يدفع المكبس (البستم) إلى أسفل بسبب الضغط العالي، وبذا يوفر مشوار القوة (power stroke). العملية كلها تشمل أربعة أشواط في محرك البنزين (الجازولين):

١. أبخرة الوقود مع الهواء في المكربن يتم سحبها إلى السيلندر أثناء جزء الحث (Induction part) وهذه الخطوة تسمى شوط السحب (suction stroke).

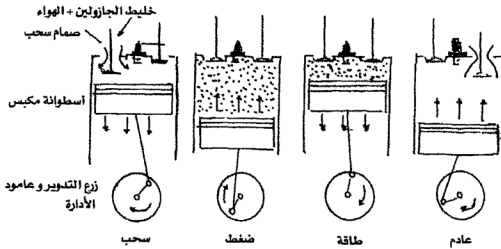
٢. خليط الوقود الهواء يتم ضغطه مكونا شوط الضغط.

٣. يتم حرق الخليط بواسطة شرارة كهربائية. الغازات الساخنة المنتجة بسبب الحرق تزيد الضغط وتدفع المكبس (البستم) إلى أسفل. هذا ما يعرف بشوط القدرة (power stroke).

٤. في الشوط الأخير، والذي يسمى شوط العادم (exhaust stroke) يهبط المكبس ويطرد الغازات العادمة من السيلندر. تبدأ الدورة التالية ثانيا. خليط الوقود يجب أن يحترق بسرعة وبنعومة، أي بعد تنشيط التفاعل بالشرر الكهربائي، فإن اللهب يجب أن ينتشر سريعا ومتجانسا خلال خليط الغاز هذا بحيث أن الغاز المتمدد يدفع المكبس إلى أسفل الاسطوانة بنعومة الشكل (١/٢٠) يمثل مخطط للأشواط الأربع لمحرك الاحتراق بالشرارة الكهربائية.

نسبة حجم الغاز في الاسطوانة عند نهاية شوط المسحب إلى الحجم عند نهاية شوط الضغط للمكبس يسمى نسبة الضغط. (compression-ratio). كفاءة المحرك

تتوقف على هذه النسبة. نسبة الضغط المرتفعة تعني زيادة كفاءة المحرك. ولكن، في حالة زيادة نسبة الضغط عن حد معين، فإن خليط الوقود الهوائي يمكن أن تحدث له سخونة إلى درجة حرارة أكبر من درجة حرارة اشتعاله ويحدث حرق فوري حتى قبل الشرر. هذا ما يسمى الحرق المسبق (pre-ignition). كذلك قد يحدث أن الجزء الأخير الذي لم يتم حرقه من خليط الوقود - الهواء بعد الشرر الكهربائي يحدث له حرق ذاتي فوري، بما ينتج عنه انفجار عنيف. هذا الانفجار ينتج موجة صدمية، والتي تنشئت طاقتها بخبط حوائط الاسطوانة والمكبس، منتجة صوت معدني مميز والذي يسمى الخبط (knocking).



شكل (١/٢٠) مخطط المراحل الأربع .. (السحب والضغط والطاقة والعادم)

لمحرك الاحتراق الداخلي والمعروف بالمحرك ذو الأربع دورات

لذلك فإن الخبط عبارة عن صوت معدني حاد يشبه القرع بالمطرقة الناتج في محركات الاحتراق الداخلي بسبب الحرق الغير ناضج لخليط الهواء - الغاز.

الخبط لا يقلل فقط كفاءة المحرك ولكن يسبب فقد كبير في الطاقة وإتلاف للأسطوانة والمكبس. ظاهرة الخبط ليست مفهومة تماما ولكن يعتقد أنها مرتبطة بالمكونات

الكيميائية للوقود سبب الخبط هو من خواص الوقود وتصميم المحرك.

التركيب الكيميائي والخبط:

التركيب الكيميائي للوقود المستخدم له علاقة قريبة بخواص الخبط:

- الاستعداد للخبط يقل مع زيادة الدمج للجزيئات ذات الرباط المزدوج والتركيب الحلقي. (compactness of the molecules double bonds, cyclic structures)
لذلك فإن الأليفينات (olefins) بذات طول سلسلة - الكربون تمتلك خواص أفضل لعدم الخبط (antiknock) عن البارافينات المقابلة.
- في حالة البارافينات العادية، يزداد الخبط مع الزيادة في طول سلسلة الهيدروكربون. لذلك فإن الاستعداد للخبط في السلسلة المستقيمة للبارافينات (paraffins) تتبع النظام التالي.

n-heptane > n-hexane > n-pentane > n-butane

- بارافينات التسلسل المتشعب (branched chain) وموقعها. لذلك فإن استعداد الخبط لمختلف المركبات الأيزوميرية (أي ذات التركيب الكيميائي الواحد ولكن تختلف في الخواص) لمركب الهبتين (Heptane) تتبع النظام التالي.

n-heptane > 2-methyl hexane > 2,2 dimethyl pentane

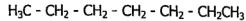
- المواد الأروماتية مثل البنزين (C_6H_6) والتولوين ($C_6H_5CH_3$) لها خواص عدم خبط عالية جدا. عموما فإن استعداد الوقود للخبط يكون طبقا للآتي:

البارافينات ذات التسلسل المستقيم < البارافينات ذات التسلسل المتشعب < الأوليفينز < البارافينات الحلقية (cyclo paraffins) < (naphthenes) < المواد الأروماتية (atomatics).

درجة الأوكتين أو رقم الأوكتين: (octane rating)

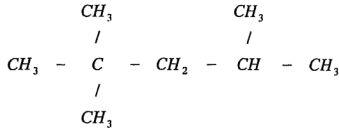
خاصية عدم الخبط للجازولين (مقاومة الخبط) لا يمكن تعريفها بمصطلحات

مطلقة. لتقيم الوقود طبقاً لخاصية الخبط، فقد تم إعداد مقياس اختياري في عام ١٩٢٦ بواسطة (edger) الذي يعرف برقم الأوكتين. فقد لوحظ أن (n-heptane) يخبط بطريقة سيئة جداً ولذلك تم تعيينه كقيمة عدم الخبط تساوي صفر. وعلى الجانب الآخر فإن الأيزو أوكتين (iso octane) (2.2 trimethyl pentane) له مقاومة عالية للخبط ولذلك تم تعيينه اختياريًا بقيمة ١٠٠.



n-heptane

قيمة عدم الخبط = صفر



أيزو أوكتين

2.4 Trimethyl pentane

antiknock value = 100

رقم الأوكتين للوقود يعرف بأنه نسب الأيزوأوكتين الموجودة في خليط من الأيزوأوكتين، n - هبتين (n-heptane) والذي له نفس خواص الخبط مثل ذلك للوقود تحت الاختبار، تحت نفس مجموعة الظروف. لذلك فإن الجازولين الذي له رقم أوكتين ٨٠، سوف يعطي نفس الخبط لخليط من الأيزو أوكتين ، n هبتين المحتوي على ٨٠% الأيزو أوكتين بالحجم. زيادة رقم الأوكتين يزيد من خاصية عدم الخبط للوقود.

رقم الأوكتين لجازولين التكسير أعلى من جازولين التقطير من الخام (straight run)، بسبب إلى النسبة الأعلى كثيراً من الهيدروكربونات الغير مشبعة والحلقية في جازولين التكسير. رقم الأوكتين لبعض الهيدروكربونات العادية موضح في الجدول الآتي:

رقم الأوكتين	الهيدروكربون	رقم الأوكتين	الهيدروكربون
٦٢	N-Pentane	١٠٦	بنزين (C_6H_6)
٢٦	N-Hexane	٩٠	Isopentane
٩٥	Alcohol	٧٧	Cyclohexane
		٧١	2-Methyl Pentane

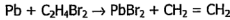
لعمل محرك الجازولين بدون حدوث خبط فإنه يلزم توفير نوعية معينة ذات أدنى - خبط. في مصر جازولين المحركات يكون من نوعين وهما رقم أوكتين ٩٠، والمتميز حيث رقم الأوكتين ١٠٠.

العوامل المساعدة في عدم الخبط: (antiknock agents)

رقم الأوكتين للجازولين التجاري لا يعود كلية للهيدروكربونات فقط. إضافات معينة تضاف إلى الجازولين لتحسين خواص عدم الخبط. هذه الإضافات تعرف بعوامل عدم الخبط. يمكن استخدام البنزول والكحولات كمعامل عدم الخبط ذلك لأن لها قيم مرتفعة لعدم الخبط.

قد يضاف تترا إيثيل ليد [$Tetraethyl Lead - Pb (C_2H_5)_4$] إلى الجازولين لزيادة الرقم الأوكتيني. (TEL) عبارة عن سائل ليس له لون وهو شديد السمية. حوالي ٠,٥ سم^٣ من (TEL) يضاف على اللتر لزيت المحركات وحوالي ١ سم^٣ يضاف على اللتر لوقود الطائرات. لمعرفة أن الوقود تم معالجته بالرصاص (leaded) يتم إضافة صبغة حمراء كذلك بنسبة ٢%. يعتقد أن الخبط هو آلية الشق الحر (Free Radical) الذي يؤدي إلى التفاعل المتسلسل والذي ينتج عنه فرقعة. أثناء الحرق يكون TEL رصاص وأكسيد رصاص (Pb, PbO). وهذه تعمل كمثبطات لسلسلة الشق الحر وبالتالي انتشار التفاعل المتسلسل المؤدي إلى الخبط يتم بتثبيط وتوقف حدوثه.

ولكن أبخرة الرصاص وأكسيد الرصاص المتكونة يمكن أن تلوث الجو. بمجرد حدوث فرقة الحرق، فإن أكسيد الرصاص يختزل فوراً إلى معدن الرصاص والذي يرسب على نقط شمعة الإشعال، وعلى جدار السيلندر ورأس المكبس (البستم). ولمنع حدوث هذه المشاكل يضاف كذلك إيثيلين داى برومايد ($C_2H_4Br_2$) ذلك ليتحول الرصاص الذي يتكون إلى بروميد الرصاص



بروميد الرصاص الذي يتكون يكون متطايراً ويهرب مع الغازات العادمة. يسبب التلوث البيئي فإن استخدام الجازولين المعالج بالرصاص تم التخلص منه حالياً. عوامل عدم الخبط هي (tertiary butyl acetate) وكذلك (diethyl telluride)، البنزول والكحول. كذلك فإن (tricresyl phosphate) الذي يكون قادراً على إحباط الحرق المسبق للوقود يمكن كذلك استخدامه. البنزين (C_6H_6) هو كذلك عامل ضد الخبط. ولكن البنزين مسرطن ولذلك فإنه في حالة استخدامه يكون بتركيزات منخفضة جداً.

جازولين الطائرات: (aviation gasoline)

الجازولين المستخدم كوقود للطائرات له رقم أوكتين ١٠٠ وأكثر. نوعية عدم الخبط للوقود تحت الاختبار أي رقم الأوكتين يتم الحصول عليه بالمقارنة بخليط من الأيزوأوكتين ونوعية معلومة من (TEL) Tetra ethyl lead كوقود عياري (قياسي). فمثلاً، رقم الأوكتين للوقود سيكون ١٠٠ + ٢ إذا كانت خواص عدم الخبط لهذا الوقود مثل خلط من أيزوأوكتين و ٢ سم^٣ من (TEL).

وقود محركات الديزل: (diesel engine fuels)

وقود محركات الديزل هو وقود محركات الحرق بالضغط (compression ignition). في محرك الديزل، يتم حرق الوقود باستخدام الحرارة والضغط وليس بالشرر الكهربائي. في محرك الديزل يتم أولاً سحب الهواء إلى الاسطوانة (مشوار

(السحب) وضغطه إلى ضغط حوالي ٢٠ - ٥٠ كجرام/سم^٢ (مشوار الضغط). خلال نهاية شوط الضغط، يتم حقن زيت الديزل في شكل نقاط صغيرة إلى الهواء المضغوط شديد السخونة. الجسيمات الصغيرة للوقود تمتص الحرارة من الهواء المضغوط ويحترق. ضغط الغاز الناتج أثناء الحرق/ الحرق يدفع المكبس إلى أسفل (شوط القوة). تتم الدورة عند مشوار العادم بينما يحدث دفع للغازات الساخنة من الاسطوانة.

الخبيط في محرك الديزل:

الخاصية الرئيسية لوقود الديزل هي أنه يشتعل بسهولة تحت درجة حرارة الضغط. الفترة بين بداية حقن الوقود والحرق يسمى تخلف أو التأخر للحث. يتضح أنه للأداء الجيد لمحرك الديزل، هذا التأخر الحثي يجب أن يكون مختصراً ما أمكن.

عندما يطول التأخر الحثي، فإن جزء كبير من الوقود الذي تم حقنه يتراكم في الاسطوانة حتى قبل الحرق وعن حدوث الحرق فإن الوقود المتراكم يحترق بعنف مع زيادة مفاجئة في درجة الحرارة والضغط. هذا الحرق الغير منظم للوقود يعرف بأنه خبيط الديزل (diesel knocking). كلما زاد التأخر الحثي كلما ارتفع خبيط الديزل.

كيميائياً وقود محرك الديزل يتكون من الهيدروكربونات ذات التسلسل المستقيم مع أدنى كمية من التسلسل المتشعب ومن الهيدروكربونات الأروماتية. لذلك، مقارنة بالجازولين فإن وقود محرك الديزل يجب أن يكون له درجة حرارة حرق فوري لخفض التأخر الحثي.

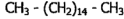
رقم السيتين: (cetane rating)

الوقود المطلوب لمحرك الديزل في مقارنة لوقود محركات الجازولين، ولذا، فإنه يستخدم مقياس مستقل لتعيين درجة زيت الديزل حيث لا يمكن تعيين درجته برقم الأكتين. رقم سيتين هي مقياس لسهولة حرق الوقود تحت الضغط. سيتين الهيدروكربون (n-hexadecane) له تأخير حرق قصير جداً مقارنة لأي وقود ديزل

وتعين له قيمة اختيارية ١٠٠. (n-methylnaphthalene) له تأخير حرق أطول مقارنة لأي وقود ديزل آخر ولذلك تم تقدير قيمته لتكون صفر.

رقم السيتين لزيت الديزل يمكن تعريفه بأنه نسبة السيتين في خليط من السيتين و

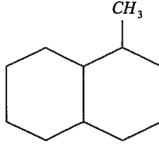
(methyl naphthalene - ∞) الذي سيكون له نفس خواص الحرق مثل الوقود تحت الحرق، في نفس الظروف المعينة. فمثلاً، فإن وقود الديزل سيحدد له رقم سيتين ٤٥ إذا كان له نفس خواص الحرق لخليط من ٤٥% سيتين، ٥٥% methyl - naphthalene). (∞ naphthalene).



Cetane

n-Hexadecane

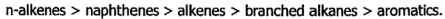
(cetane No.100)



- methyl naphthalene ∞

(cetane No. zero)

رقم السيتين للوقود يتوقف على طبيعة ومكونات الهيدروكربون. الهيدروكربون بالتسلسل المستقيم يحترق سريعاً إلى حد ما بينما الأروماتيك لا يحترق بسهولة. نظام نوعية الحريق بين مكونات وقود الديزل بالنسبة لتقليل رقم السيتين هو كالآتي:



يتضح مما سبق أن حالات الخبط لوقود الديزل هي على العكس تماماً لما هو مطلوب للخط في محركات الجازولين. هذا لأن سبب الخبط مختلف في كلا الحالتين. في محركات الجازولين فإن الحرق المسبق بالضغط يؤدي إلى الخبط ولذلك فإن الوقود ذو درجة حرارة اشتعال مرتفعة يكون مطلوباً. على الجانب الآخر في

محركات الديزل فإن تأخير الحرق هو سبب الخبط ويكون المطلوب هو الوقود الذي له درجة حرارة حرق منخفضة. لذلك، وقود محركات الجازولين الجيد يكون وقود رديء في محركات الديزل والعكس صحيح. رقم السيتين لوقود الديزل يمكن زيادته بإضافة إضافات سيتين. الإضافات المستخدمة عادة هي الآتية بعد (ethyl nitrate, isoamyl nitrate, acetone... etc)

جدول () مقارنة بين وقود الجازولين ووقود الديزل

وقود الديزل	وقود الجازولين
١- هو الجزء الذي يتم الحصول عليه بين ٢٥٠ - ٣٢٠ °م وهو خليط من هيدروكربونات $C_{18} - H_{38}$, $C_{15} - H_{23}$	١- هو جزء الذي يتم الحصول عليه بين ٤٠ - ١٢٠ °م وهو خليط من الهيدروكربونات $C_9 - H_{20}$, $C_5 - H_{12}$
سعره رخيص	سعره مرتفع
٣- استهلاك الوقود قليل بالنسبة لوحد الطاقة المنتجة	٣- استهلاك الوقود عالي بالنسبة لوحد الطاقة المنتجة
٤- مناسب لمحركات الضغط	٤- مناسب لمحركات الحرق بالشرارة الكهربائية
٥- الخبط يكون بسبب تأخير الحرق	٥- الخبط يكون بسبب الحرق المسبق
٦- خواص الحرق يعبر عنها برقم السيتين	٦- خواص الحرق يعبر عنها برقم الأوكتين
٧- غازات العادم تحتوي على كمية قليلة من الملوثات	٧- غازات العادم تحتوي على نسبة ملوثات أعلى
٨- الحرق يحتاج إلى تجهيزة حرق الوقود الأكثر تكلفة	٨- الحرق يحتاج إلى مكربن بسيط
٩- تستخدم إضافات من مواد alkyl	٩- يستخدم المواد tetra ethyl lead

وقود الديزل	وقود الجازولين
nitrates and acetone...etc لخفض الخبط	(TEL) , tellurides وذلك لخفض الخبط

إصلاح الجازولين: (Reforming)

بهدف زيادة خاصية عدم الخبط للجازولين المنتج من برج التقطير (برج التجزئة) (straight run gasoline) فإنه يتم تعريضه لنوع خاص من المعالجة المعروف باسم الإصلاح. الإصلاح يحدث تعديل في بناء مكونات الجازولين. هذا التعديل هو أساسا نتيجة إعادة تنظيم الجزيئات بدون تأثير كبير على متوسط وزنها الجزيئي. التفاعلات الرئيسية في الإصلاح (التحسين) هي الآتي:

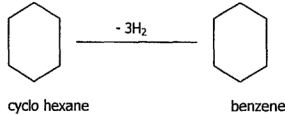
١. تكوين مركبات أروماتية بإزالة الهيدروجين من السيكلو ألكينز.

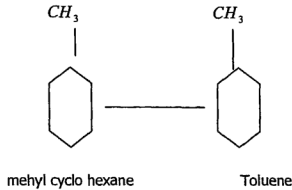
٢. إزالة الهيدروجين من البارافينات وتحويلها إلى حلقية.

٣. التكسير بالهيدروجين hydrocracking.

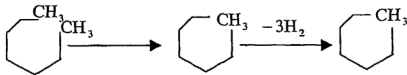
٤. الأزمرة isomerization.

الحالة (١) تكوين مركبات أروماتية بإزالة الهيدروجين

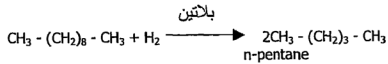




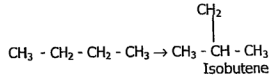
الحالة (٢) dehydro cyclization of paraffins



الحالة (٣) التكسير الهيدروجيني (hydrocracking)



الحالة (٤) الأزمرة Isomerization



التحسين أو الإصلاح للجازولين يمكن أن يتم إما حراريا أو في وجود عامل وسيط

التحسين الحراري: (thermal reforming)

التحسين الحراري يشمل تسخين الجازولين المنتج من برج الكسير إلى ٥٠٠ - ٦٠٠ °م وعند ضغط ٨٥ كجرام/سم^٢. يتم التحكم في درجة التحسين بالتبريد السريع للمنتجات برش الزيت البارد. المنتجات المحسنة يتم عندئذ تجزئتها لإزالة

المتبقي من الغازات. أثناء التحسين الحراري فإن المركبات المتكونة من (alkanes, alkenes) بسبب التكسير يحدث لها إزالة للهيدروجين وتحويل حلقي (cyclization) لتكوين مركبات (naphthenes). مركبات n-alkanes قد يتحول كذلك إلى بناء متسلسل ومتشعب (branched chain) بما يحقق رقم أوكتين أعلى للمنتجات.

التحسين بالعامل الوسيط: (catalytic reforming)

التحسين بالعامل الوسيط يتم باستخدام عامل وسيط من البلاتين المحمول على الألومنيوم. ويتم عند درجة حرارة حوالي ٤٦٠ - ٥٣٠ °م وعند ضغط ٣٥ - ٥١ كجرام/سم^٢. التحسين باستخدام العامل الوسيط ينتج منتجات لها خواص متميزة كوقود مقارنة بالتحسين الحراري.

الهيدروجين المنبعث في تفاعلات التحسين يستخدم لعملية درجة الألكينز (alkenes)، تحسين التكسير لمركبات الألكينات الضخمة (larger alkanes) أو لإزالة الكبريت في الشحنة في شكل H₂S.

الوقود الغير بترولي: (non-petroleum fuels)

١. البنزول (benzol)

البنزول هو أحد المنتجات الجانبية (by products) لكرينة الفحم. وينتج كذلك أثناء التقطير الجزئي للزيت الخفيف. البنزول هو أساسا خليط من البنزين ٧٠% (C₆H₆)، التولوين ١٨% (C₆H₅CH₃)، الإكزايلين (٦%) (xylenes) ومركبات هيدروكربونية أخرى. رقمه الأوكيني ٨٧ - ٩٠. البنزول لا يمكن استخدامه كوقود للمحرك بمفرده ذلك لارتفاع درجة حرارة غليانه الأولية، بالإضافة إلى أن نقطة تجمده هي ٥٥ °م وبالتالي لا يمكن استخدامه في المناخ البارد. وهو بذلك يستخدم كعامل مضاف فقط. إضافة ٥٠% لبنزول المحرك فإن رقم الأكتين للجازولين يرتفع من ٧٠

إلى ٨٠. القيمة الحرارية للبنزول هي حوالي ١٠٢٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلوجرام.

٢. كحول الطاقة (power alcohol)

الكحول الإيثيلي (ethyl alcohol) وقود سائل هام وعند استخدامه في محركات الاحتراق الداخلي فإنه يسمى (power alcohol). الكحول الإيثيلي لا يستخدم كوقود رئيسي ولكن يتم خلطه مع الجازولين لزيادة الرقم الأوكتيني. عموماً يوجد الجازولين والكحول بنسبة ٤ : ١ . القيمة الحرارية للكحول الإيثيلي هي أقل من ٧٠٠٠ كيلو سعر حراري/ كجرام ولكن له صفات عدم خبط جيدة. رقمه الأوكتيني ٩٠. بسبب عدم وجود أجزاء ذا درجة حرارة غليان منخفضة في الكحول الإيثيلي فإنه يصعب البدء في المحرك البارد إذا استخدام الكحول الإيثيلي فقط. لذلك فإنه دائماً يتم خلطه مع الجازولين. يجب التأكيد أن الكحول الإيثيلي يمكن خلطه جيداً مع الجازولين فقط في وجود البنزين، التترالين أو الإيثير.

صناعة كحول الطاقة:

أهمية الكحول الإيثيلي كوقود تقع في حقيقة أنه ينتج من الكربوهيدريزس والتي هي عمليات تحليل طبيعية معمرة وبذا فإنه يصنع بتكلفة مناسبة. يمكن تصنيع الكحول الإيثيلي من الهيدروكربونات، الكربوهيدريزس، النشويات والعسل الأسود، سوائل مخلفات الكبريتيت (wastesulphite liquor) من صناعة الورق ولب الورق.

ويصنع الكحول الإيثيلي من العسل الأسود (molasses)، وهو سائل بني داكن يوجد بعد بلورة السكر من عصير قصب السكر المركز وهو يحتوي على ٥٠% من السكر الغير مبلور والجلوكوز والفركتوز. استعادة السكر هذا من المولاس (العسل الأسود) هي عملية مكلفة، لذلك فإنه يستخدم في صناعة الكحول. تكوين الكحول يتضمن الخطوات الآتية:

١. التخفيف:

التركيز العالي للسكر في العسل الأسود يكون غير مناسب لتفاعل التخمر وبالتالي فإنه يتم تخفيفه بالماء للحصول على محلول بتركيز ٨ - ١٠% من السكريات.

٢. إضافة حامض كبريتيك مخفف:

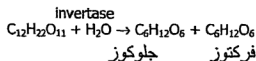
في عملية التخمر يتم المحافظة على الرقم الهيدروجيني للمحلول (pH) ما بين ٤ إلى ٥. يضاف حامض الكبريتيك لضبط الرقم الهيدروجيني بين ٤ - ٥. هذا الرقم الهيدروجيني ينشط نمو كائنات الخميرة المطلوبة ولكنه يعيق نمو أي نوع آخر من البكتيريا التي يمكن أن تلوث المحلول.

٣. إضافة أملاح الأمونيا (ammonium salts):

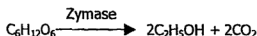
عند عدم احتواء العسل الأسود على الكمية الكافية من غذاء الخميرة، فإنه يتم إضافة بعض مواد الغذاء مثل كبريتات الأمونيوم، فوسفات الأمونيوم للتغلب على نقص عنصري الفوسفور والنيتروجين. وهذه تعمل كغذاء للتخمر.

٤. إضافة الخميرة (Yeast) التخمر:

وهذه هي الخطوة الرئيسية في تكوين الكحول من العسل الأسود. التخمر هو العملية التي يحدث فيها تحلل للمواد العضوية المعقدة إلى مركبات بسيطة بسبب نشاط كائنات حية صغيرة معينة. إلى المحلول السابق يتم إضافة سلالة منتقاة من الخميرة. يتم المحافظة على الخليط عند درجة حرارة ٣٠ °م لمدة ٢ - ٣ يوم. أثناء هذه الفترة يحدث التخمر. الأنزيمات الموجودة في الخميرة (invertase and symase) تقوم بتحلل السكر إلى الكحول الإيثيلي مع تصاعد غاز CO₂.



symase



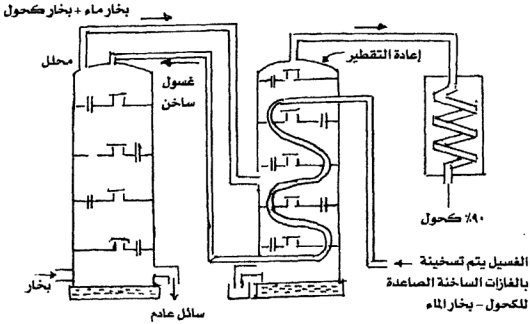
عند توقف تصاعد غاز CO_2 ، يتم ترشيح الخميرة. وترشيح المحلول المتخمر. هذا السائل بعد الترشيح يسمى (النقع - wort)، والذي يحتوي على ٦ - ١٠% كحول إيثيلي، ٣ - ٥% جلسرين، ألدهايدز، كحولات عالية....الخ. يتم تقطيره للحصول على الكحول الإيثيلي (ethy alcohol).

٥. التقطير (distillation)

يتم التقطير في وحدة تقطير خاصة تسمى (coffee still). وهي تتكون من محلل (analyzer)، ووحدة إعادة تقطير (rectifier). مزود بألواح مثقبة بمحابس تفتح إلى أعلى. يتم تحريك البخار والكحول في الاتجاه المعاكس شكل (١/٢١).

يدخل إدخال تيار من البخار من القاع للمحلل والنقع/ الغسول (ناتج الترشيح من الخطوة رقم ٤) يتم إدخاله من أعلى. يتم للتسخين المسبق للغسول قبل دخوله إلى المحلل. عند حدوث التصاق بين البخار والغسول فإن الكحول في الغسول يتبخر ويحمل إلى المقطر الثاني (rectifier) مع البخار. في المقطر الثاني يحدث تكثف للبخار بينما يتبخر الكحول (درجة غليانه $78,3^\circ\text{C}$) ويهرب من المقطر الثاني ويتم تكثيفه منفصلاً. تركيز الكحول لا يمكن زيادته بالتقطير أكثر من ٩٧,٦% لأنه يكون خليط ذو درجة حرارة غليان ثابتة مع الماء. الخليط ذو درجة حرارة غليان ثابتة له درجة حرارة غليان أقل من الماء.

للاستخدام في محركات الاحتراق الداخلي يتم تحضير كحول ١٠٠% (كحول مطلق). ويتم هذا بعملية تسمى الخليط ذو درجة حرارة الغليان الثابتة. (azeotropic process).



شكل (١/٢١) تقطير الغسيل الرديئ

التقطير بدرجة حرارة الغليان الثابتة: (azeotropic distillation)

في هذه العملية، الكحول الذي تم الحصول عليه من الخطوة السابقة يتم خلطه مع البنزين أو رابع كلوريد الكربون (CCl_4) ثم تقطير الخليط. البنزين أو رابع كلوريد الكربون طبقا لما يكون عليه الحال، يتقطر آخذا معه جزء من الكحول والماء تاركا خلفه الكحول المطلق (absolute alcohol).

الكحول المطلق يمكن تحضيره كذلك بهضم الكحول الذي تم إعادة تقطيره مع الجير المطفي لمدة يومين ثم التقطير. الأجزاء الأولى والأخيرة يتم التخلص منها ، والجزء الأوسط يكون هو الكحول المطلق.

مميزات الجازولين المخلوط بالكحول:

١. رقم الأوكتين للكحول مرتفع إلى حد ما (٩٠). لذلك عند خلطه مع الجازولين فإنه يزيد رقم الاكتين للجازولين. وهذا يحسن من خاصية عدم الخبط للجازولين.

٢. لا يوجد خفض في خرج الطاقة أو زيادة في الاستهلاك النوعي للوقود عند خلط الكحول مع الجازولين.

٣. يتم التغلب على صعوبات البداية (التحضير) بسبب درجة حرارة الغليان العالية للكحول، عند الإستخدام في شكل خليط مع الجازولين.

٤. خليط الكحول - الجازولين له استعداد لامتصاص آثار الرطوبة الموجودة.

عيوب الجازولين المخلوط بالكحول:

١. القيمة الحرارية للكحول منخفضة ولذا فإنه يقلل القيمة الحرارية للجازولين.

٢. الكحول سهل الأكسدة مكوناً أحماض وبذا يسبب التآكل.

٣. نظراً لأن الهواء المطلوب لإكمال الحرق يكون أقل من الهواء اللازم للجازولين لذلك فإنه يتم تنظيم دخول الهواء إلى الاسطوانة بتطوير مدخل الهواء.

٤. نسبة تدفق الخليط تزداد إلى ١,٥٦ ضعف الجازولين فقط بتغيير حجم بائق المكربن (carburettor jet).

الفصل الرابع

4

الوقود الغاز Gaseous Fuels

الخواص المميزة للوقود الغاز التي تجعله أفضل وقود هي، عدم وجود ملوثات معدنية، ثبات النوعية، مناسبة الاستخدام، كفاءة عالية، قيمة حرارية عالية، وكثيراً آخر. تفضيل الوقود الغاز تم الحكم عليه بحقيقة بسيطة وهي أن الوقود الغاز يستخدم على نطاق كبير في الاستخدام المنزلي والصناعي. بعض أنواع الوقود الغاز التجاري سيتم تناولها وهي الغاز الطبيعي، غاز الإنتاج، غاز الماء، غاز فرن الكوك.

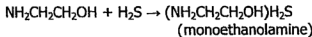
١- الغاز الطبيعي: (Natural Gas)

الغاز الطبيعي هو وقود غاز هام مصاحب للرواسب البترولية. كما يوجد كذلك قريباً من مناجم الفحم وحقول البترول. الغاز الطبيعي المستخرج من آبار الزيت يمكن أن يكون إما جاف أو رطب. عندما لا يكون هناك زيت ولكن الغاز فقط في بئر البترول فإن الغاز يسمى الغاز الجاف (dry gas). في الغاز الجاف توجد الهيدروكربونات المنخفضة (lower) مثل الميثان والإيثان (methane, ethane). على الجانب الآخر عند وجود الغاز الطبيعي مع البترول في آبار البترول فإنه يسمى الغاز الرطب (wet gas). الغاز الرطب يتكون من الهيدروكربونات الأعلى (higher) مع

الميثان. القيمة الحرارية للغاز الرطب أعلى من تلك للغاز الجاف بسبب النسبة العالية للجزيئات الأثقل الغير مشبعة.

الغاز الطبيعي يتم تعريضه لمختلف المعالجات قبل استخدامه. مختلف المنتجات الجانبية من الغاز الطبيعي الخام هي ذات أهمية صناعية هامة ويتم استعادتها بوسائل مختلفة.

الغاز الرطب يستخرج منه الجازولين المتطاير (أو ذو درجة حرارة الغليان المنخفضة) والذي يسمى جازولين رأس القيسون (casing head gasoline). الجازولين من الغاز يمكن إزالته بالضغط، أو بغسيل الزيت (oil scrubbing) أو بالادمصاص بالفحم النباتي المنشط. منتجات أخرى ذات قيمة وهي (butane, propane, ethane, methane) والتي تستخدم كغاز البترول المسال (LPG). بالإضافة إلى المنتجات ذات القيمة الصناعية، فإن الغازات الطبيعية تحتوي على بعض المكونات الغير مرغوب فيها مثل الماء، الغبار، H_2S ، CO_2 . الماء يتم إزالته بمعالجة الغاز مع مادة تجفيف مثل الألومينا (alumina)، السيليكا جيل، حامض الكبريتيك أو كلوريد الكالسيوم CaCl_2 الخ. H_2S يتم إزالته بإذابته في الإيثانول أمين، يليه التسخين.



عند التسخين ينطلق H_2S . الغاز الذي يكون خاليا من كبريتيد الهيدروجين يسمى الغاز الحلو (sweet gas). كذلك يزال CO_2 بالتسخين مع NH_3 .

$$2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$$

المكونات (Composition)

المكونات الحقيقية للغاز الطبيعي تختلف كثيرا من حقل إلى آخر، المحتوى من الميثان (methane) يتراوح ما بين ٥٠% إلى ٩٠%. متوسط مكونات الغاز هي: $\text{CH}_4 = ٧٠ - ٩٠\%$ ، $\text{C}_2\text{H}_6 = ٥ - ١٠\%$ ، $\text{H}_2 = ٣\%$ ، $\text{CO} + \text{CO}_2 =$ الباقي.

القيمة الحرارية تتراوح ما بين ١٢٠٠٠ إلى ١٤٠٠٠ كيلو سعر حراري/ المتر المكعب.

الاستخدام:

- يستخدم في المجال المنزلي والصناعي ويحترق بلهب ساخن أزرق. يصل إلى المستهلك بواسطة شبكة من خطوط المواسير.
- يستخدم كمادة خام في تصنيع الميثانول، الفورمالدهايد، ومركبات كيميائية أخرى.
- يستخدم على نطاق واسع كمصدر للكربون والهيدروجين في الصناعات الكيميائية.
- يستخدم كذلك كمادة خام في صناعة اسود الكربون (carbon black).
- يمكن إنتاج البروتين الصناعي من الميثان بالصياغة الميكروبيولوجية (micro biological for mulation).

غاز البترول المسال (Liquified Petroleum Gas)

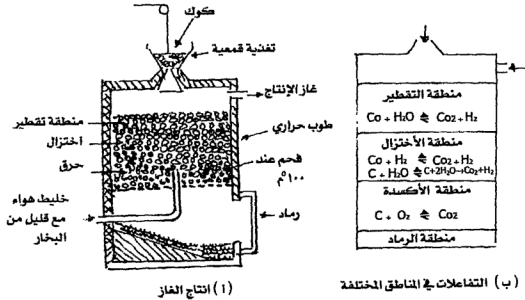
يتكون غاز البترول المسال من الهيدروكربونات الخفيفة (حتى C_4) مثل البروبين (C_3H_6) والبيوتان (C_4H_{10}) الذي يمكن أن يسال سريعا تحت الضغط ولكن يمكن أن يوجد كغازات تحت الضغط الجوي. غاز البترول المسال يستخدم أساسا حاليا كوقود منزلي وإلى حد كبير كوقود صناعي كذلك. يتم عادة الإمداد به في اسطوانات تحت الضغط، بمختلف الأسماء التجارية. يمكن استخدام غاز البترول المسال كوقود للمحرك حيث يمكن خلطه بسهولة مع الهواء ويحترق نظيفا بدون أي متبقي كما أنه مقاوم للخبث، ولكن يلزم تداوله تحت ضغط ويفضل استخدامه فقط في المحركات التي تعمل تحت نسب ضغط عالية. البيوتين السائل يستخدم أساسا في الأغراض المنزلية، بينما يستخدم البروبين السائل أساسا في الأغراض الصناعية بسبب ضغطه الأعلى. غاز البترول المسال (LP6) أساسا (C_3H_6) له قيمة حرارية

حوالي ٢٥٠٠ كيلو سعر حراري/ م^٢. يستخدم غاز البترول المسال الآن كوقود للسيارات.

غاز الإنتاج (Producer Gas) شكل (١/٢٢)

خليط الغاز القابل للاحتراق الذي يتم الحصول عليه بتمرير الهواء والبخار فوق الفحم أو الكوك المتوهج يعرف بغاز الإنتاج المصنع حيث يحدث التفاعل يسمى غاز الإنتاج أو ببساطة (producer). المكونات الرئيسية لغاز الإنتاج هو أول أكسيد الكربون والنيتروجين. وهو وقود صناعي رخيص الذي يمكن الحصول عليه من الفحم ذو الرتبة المتدنية. فحم المستنقعات (peat)، مخلفات الأخشاب، لحاء وقشر الشجر وأي نوع آخر من الوقود الكربوني يمكن استخدامه.

الوقود الأكثر استخداما عموما هو الفحم والكوك. ولكن يعتبر أرخص وقود غازي ولكن بسبب وجود نسبة كبيرة من النيتروجين الذي لا يحترق فإن القيمة الحرارية هي الأدنى (١٣٠٠ كيلو سعر حراري/ المتر المكعب).



شكل (١/٢٢)

التصنيع:

ينتج غاز الإنتاج من فرن أسطوانتي ضخمة (قطر داخلي ٦ - ١٢ قدم وارتفاع ١٠ - ١٥ قدم) المبطن بالطوب الحراري، ويجهز بمدخل للهواء عند القاع ومخرج للرماد. مزود عند القمة بقمع تغذية وفتحة جانبية لإزالة غاز الإنتاج المتكون. عند اختلاط خليط الهواء مع البخار ومروره فوق طبقة من الكوك أو الفحم الأحمر الساخن عند حوالي ١٠٠٠ °م إلى ١١٠٠ °م، فإن التفاعلات الآتية تحدث في أربع مناطق وهي:

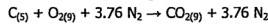
١. منطقة الرماد (Ash Zone)

وهي المنخفضة الأكثر انخفاضا، بسمك حوالي ٨ سم، والتي تحتوي الرماد المتكون. الرماد يحمي المصبعة الشبكية الحديدية من شدة حرارة الحرق. بالإضافة، إلى أن الهواء والبخار المار خلال هذه المنطقة يتم تسخينه.

٢. منطقة الأكسدة:

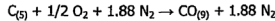
عند التصاق الهواء مع الكوك أو الفحم الصلب، فإن كربون الفحم يحترق في وجود الهواء لتكوين CO , CO_2 . درجة حرارة هذه

المنطقة هي حوالي ١١٠٠ °م



هواء

$$\Delta H = - 97 \text{ kcal}$$



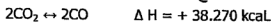
هواء

$$\Delta H = - 29.5 \text{ kcal}$$

منطقة الاختزال:

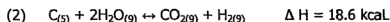
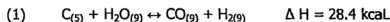
ثاني أكسيد الكربون المتكون في التفاعل السابق يحدث له اختزال إلى CO

بالتفاعل مع الكوك الأحمر الساخن.



اختزال CO_2 هو تفاعل منتج للحرارة وهو التفاعل الوحيد الهام الذي يتحكم في العملية. ينشط تكون (CO) عند درجة حرارية مرتفعة وعند حوالي 1050°C ، الخليط يحتوي $99,6\%$ CO، فقط $0,4\%$ CO_2 . لذلك فإنه لإنتاج (CO)، فإن درجة الحرارة الإنتاج يجب أن تكون عند 1050°C .

ولكن، التفاعل الكلي المؤدي إلى تكون (CO) هو تفاعل منتج للحرارة. بسبب هذا، فإن درجة حرارة طبقة الوقود ترتفع إلى حد أن الرماد في طبقة الوقود ينصهر ويتكون كرات الكنكر. هذا الكنكر يربك توزيع الهواء، ويغمر الكربون الذي لم يحترق ويقلل من كفاءة العملية. بالإضافة إلى أن درجة الحرارة العالية يمكن أن تؤثر على البطانة الحرارية. لتجنب هذه المشاكل، فإنه يستخدم الهواء المخلوط مع البخار. استخدام البخار في تيار الهواء يقلل درجة حرارة طبقة الوقود بالتفاعلات الآتية:



هذين التفاعلين هما من التفاعلات المنتجة للحرارة بما يقلل من درجة حرارة طبقة الوقود. تفاعل غاز الماء (1) يسود عند 1000°C ويكون أكثر حيث التفاعل (2) يفضل عند درجات الحرارة المنخفضة. حيث أن CO_2 هو تكون غير مرغوب (غير قابل للاحتراق)، فإن درجة حرارة يجب أن تظل أعلى من 1000°C وذلك لإيقاف التفاعل (2). في الواقع، فإنه يجب استمرار الاتزان بين إمداد الهواء والبخار وذلك للمحافظة على درجة حرارة غاز الإنتاج عند 1000°C ، والذي هو أساسا لتفاعل الأكسدة.

منطقة التقطير:

هذه هي أعلى منطقة عند درجة الحرارة من $400 - 800^\circ\text{C}$ وتعمل كم منطقة تسخين مسبق. في هذه المنطقة الكوك/ الفحم الذي يهبط يتم تسخينه بواسطة غاز

الإنتاج الخارج. بخار الماء والمادة المتطايرة للوقود يتم إضافتهم إلى الغاز الخارج. بعض من CO يمكن كذلك أن يتفاعل مع البخار في هذه المنطقة.

$$\text{CO}_{(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(g)} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2 \quad \Delta H = -10 \text{ kcal}$$

هذا تفاعل غير مرغوب فيه والذي يرفع تركيز غاز (CO₂) الخامل ويقلل القيمة الحرارية للمنتج.

المكونات: (composition)

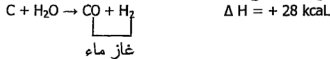
المكون الصحيح لغاز الإنتاج يتوقف على نوع الوقود، مكونات الهواء + البخار ومختلف العمليات الأخرى. متوسط مكونات غاز الإنتاج هو CO = ٢٢ - ٣٠ % ، H₂ = ٨ - ١٢ % ، N₂ = ٥٢ - ٥٥ % ، CO₂ = ٣ %.

الاستخدام: uses

١. أرخص وقود غاز، يمكن تصنيعه من مخلفات الخشب، نشارة الخشب، من الفحم البني ومن فحم المستنقعات.
٢. يستخدم كوقود لأفران الجمر المفتوحة (في صناعة الزجاج وفي صناعة الصلب)، الأفران اللافحة، المعوجات (يستخدم في تصنيع الكوك والفحم....الخ). الغاز الخام الساخن يتم تغذيته مباشرة في الفرن.
٣. يستخدم كعامل اختزال في العمليات الميثاليرجية.

غاز الماء: (Water Gas) شكل (١/٢٣)

غاز الماء يسمى عادة الغاز الأزرق لأنه يحترق بلهب أزرق. وهو يتكون أساساً من خليط من أول أكسيد الكربون والهيدروجين. لأن كلا المكونين قابل للاحتراق فإن لهما قيمة حرارية عالية ٢٨٠٠ كيلو سعر/ المتر المربع، عن غاز الإنتاج. فهو ينتج بمرور البخار فوق الكوك الأحمر الساخن عند حوالي ١٠٠٠ °م.



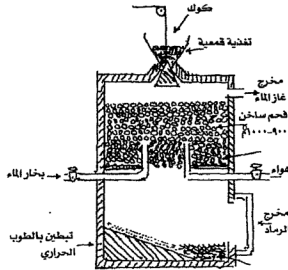
التفاعل السابق هو عملية منتجة للحرارة. لذلك يلزم كمية كبيرة من الحرارة

لاستمرار درجة الحرارة الفرن. ولكن الإمداد بالحرارة المطلوبة خارجيا يكون غير اقتصادي جدا. لذلك فإن إنتاج ماء الغاز يتم في عملية حلقيّة، تشمل خطوتين. في أحد الخطوتين، يتم توليد الحرارة لرفع درجة الحرارة للطبقة بنفخ الهواء وفي الخطوة الأخرى يتم دفع البخار وتكوين غاز الماء يتم مع امتصاص الحرارة - تلك الخطوتين تسمى فترات النفخ ودورة معالجة (blow and run) على التوالي.

التصنيع:

يتكون مولد الغاز من اسطوانة من الصلب مبطنة ببطانة من الحراريات. ولها قمع للتغذية من أعلى. مخرج غاز الماء يكون كذلك قريبا من القمة. المولد له مدخلين منفصلين لنفخ الهواء والبخار. القاع مجهز لخروج الرماد. دورة العمل تتكون من الخطوتين الآتيتين:

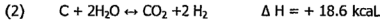
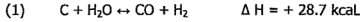
١. يتم مرور الهواء خلال طبقة الكوك عند احتراق كربون الكوك لإنتاج CO_2 - نظرا لأن التفاعل منتج للحرارة فإن درجة حرارة طبقة الوقود تزداد إلى حوالي $1000^{\circ}C$



شكل (١/٢٣) إنتاج غاز الماء

٢. عند الوصول إلى درجة الحرارة المرتفعة الكافية (١٠٠٠ م°)، يتم توقف تيار الهواء ودفع بخار الماء خلال الكوك الأحمر الساخن

لتكوين H_2 , CO



التفاعل (١) يسود عند درجات الحرارة العالية ويكون تفاعل مرغوبا فيه. بينما التفاعل (٢) يسود عند درجات الحرارة المنخفضة. بسبب التفاعل الذي يمتص حرارة لهذه التفاعلات، فإن درجة حرارة طبقة الوقود منخفض والتفاعل الغير مطلوب (٢) يحدث. في هذه المرحلة، يتم توقف إمداد البخار ودفع الهواء ثانيا لرفع درجة الحرارة إلى ١٠٠٠ - ١١٠٠ م°.

تلك الخطوتين يتم بذلك تكرارهما بالتبادل لاستمرار درجة الحرارة المناسبة. الفترة الزمنية لدفع بخار الماء (النفخ البارد) عادة ٤ دقائق بينما فترة نفخ الهواء (النفخ الساخن) هو حوالي ١ - ٢ دقيقة.

المكونات:

متوسط المكونات لغاز الماء هو $H_2 = ٥١\%$ ، $CO = ٤١\%$ ، $N_2 = ٤\%$ ، $CO_2 = ٤\%$.

غاز الماء يعطي لهب أزرق بسبب زيادة المحتوى من أول أكسيد الكربون، درجة حرارة اللهب حوالي ١٨٠٠ م°.

الاستخدام:

- يستخدم كمصدر للهيدروجين لتخليق الأمونيا.
- يستخدم كوقود للأفران.
- عند الخلط مع الهيدروجين يستخدم في صناعة الميثانول.
- يستخدم طريقة فيشر تروبش لإنتاج منتج شبيه بالبترو.

- ماء الغاز يستخدم كذلك لتحضير ماء الغاز المكربن والذي يمكن استخدامه في أغراض التسخين والإضاءة.

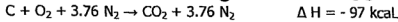
غاز الماء المكربن: (Carburetted Water Gas) شكل (١/٢٤)

القيمة الحرارية للغاز الأزرق منخفضة جدا حيث تكون غير مؤثرة كوقود غاز، ولذلك يتم زيادة قيمتها الحرارية بغازات الهيدروكربونات التي يتم الحصول عليها بتكسير زيت البترول. غاز الماء المستخدم للتقوية يسمى غاز الماء المكربن.

التصنيع:

يتكون جهاز تصنيع غاز الماء المكربن من وحدتين إضافيتين وهما المكربن (carburetter) والسخان الفائق (super heater) بجانب مولد غاز الماء الذي تم مناقشته. كل من المكربن ووحدة التسخين الفائق عبارة عن أوعية من الصلب المبطن بالطوب الحراري مع نظام بناء من الطوب الترابيعي (checker brick) لتوفير سطح تكثيف للتبادل الحراري. إنتاج غاز الماء المكربن يمكن شرحه في ثلاث خطوات:

- عند مرور الهواء خلال طبقة الكوك في المولد، وارتفاع درجة الحرارة بسبب التفاعل المنتج للحرارة.



- الغازات الساخنة المنتجة يتم توجيهها إلى المكربن، والذي يعمل على تسخين الطوب، الحوائط الجانبية والقو. تيار من الهواء الثاني يتم دفعه في المكربن لحرق تيار الغازات وإنتاج حرارة أكثر. الحرق يتم في وحدة التسخين الفائق (super heater). غازات الحرق تدخل عندئذ غلاية استخدام الحرارة (waste heat) ثم أخيرا تتصرف خلال المدخنة.

- عند الوصول إلى درجة حرارة كافية في المولد، المكربن، وحدة التسخين الفائق، يتم إيقاف تيار الهواء ودفع البخار خلال الكوك

الأحمر الساخن. غاز الماء المنتج، كما تم وصفه سابقاً، يتم توجيهه إلى المكربن. في نفس الوقت يتم رش الزيت في المكربن، والذي يتبخر ويتكسر. نتيجة التكسير تختلط مع غاز الماء.

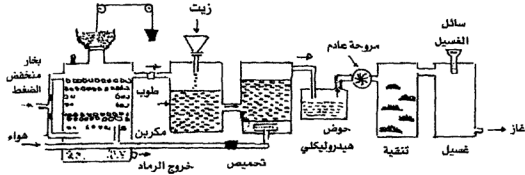
■ خليط الغازات يمر على وحدة التسخين الفائق حيث يستمر التكسير للزيت الذي يتحول إلى الحالة الغازية ويصبح التكسير تاماً. غاز الماء مع أبخرة الزيت التي تم تكسيدها يكون غاز الماء المكربن الذي يتم توجيهه إلى خط هيدروليكي وجهاز التنقية. الزيت المستخدم في الكربنة يكون عادة جزء عالي من البترول يتكون أساساً من البارافينات ذات درجة حرارة غليان من ٢٠٠ - ٣٠٠ °م. الزيوت الأثقل أحياناً يتم استخدامها.

المكونات:

متوسط المكونات لغاز الماء المكربن هي $CO = 23 - 28\%$ ، $H_2 = 34 - 38\%$ ، الهيدروكربونات (المشبعة وغير مشبعة) $= 30 - 38\%$ ، $CO_2 = 0,2 - 2,5\%$ ، $N_2 = 2,5 - 5\%$ طاقته الحرارية حوالي ٣٥٠٠ - ٤٤٥٠ كيلو سعر حراري/م^٣.

الاستخدامات:

- يستخدم كمصدر للحرارة حيث يمتلك قيمة حرارية مرتفعة.
- يستخدم لأغراض الإضاءة.
- يستخدم كبديل لغاز الفحم.



شكل (١/٢٤) وحدة كبريتة غاز الماء

غاز الفحم (غاز فرن الكوك): Coal Gas (Coke Oven Gas) شكل (١/٢٥)

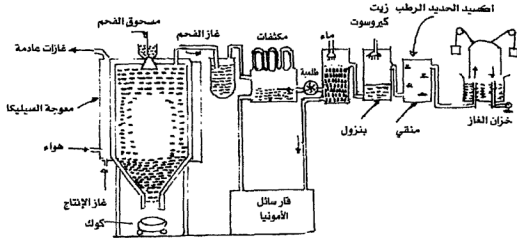
غاز الفحم وغاز فرن الكوك يتم الحصول عليهما بكربنة الفحم عند درجة الحرارة العالية. كربنة الفحم تؤدي إلى تصاعد منتجات غازية. الغاز المنتج من معوجات إنتاج الغاز يسمى غاز الفحم بينما الغاز المنتج من أفران صناعة الكوك يسمى غاز فرن الكوك. كلاهما متشابهة جدا. الفرق يرجع إلى طبيعة الفحم المستخدم وكذلك إلى حالات الكربنة المختلفة. غاز الفحم يتم تصنيعه بتسخين الفحم الغني بالمواد المتطايرة (٣٠ - ٤٠%) في معوجات أفقية أو رأسية حتى ١٣٥٠ °م والغاز يكون هو المنتج الرئيسي.

° ١٣٠٠

فحم ← كوك + غاز الفحم ↑

في معزل عن الهواء

مخطط للعملية موضح في الشكل (١/٢٥). الغاز المنتج يحتوي على عدد كبير من الملوثات ذات القيمة والتي تزال من غاز الفحم أساسا بسبب قيمتها في الاستخدام. بالإضافة إلى أن إزالتها تحسن نوعية الغاز.



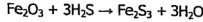
شكل (١/٢٥) صناعة غاز الفحم

الغاز (عند حوالي ٧٠٠ - ٨٠٠ م°) يتم تمريره خلال خط مواسير هيدروليكي حيث يحدث تكثف لبعض من القار والأمونيا. المسار الهيدروليكي يعمل كذلك مانع للماء حيث يمنع مرور الغازات إلى الخلف نحو المعوجة. يتم توجيه الغاز إلى مكثف ضخم حيث يتم إزالة كثيرا من القار والأمونيا ويتم جمعهم سفليا في طبقتين منفصلتين في خزان قار الفحم من غاز الفحم يعتبر مصدر غني بالكيمويات.

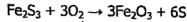
يتم عندئذ تمرير الغازات خلال أبراج الغسيل (scrubber) تحت الضغط بمساعدة طلمبة العادم. عندئذ يتم تبريد الغازات الساخنة برشها بنافورات من الماء عند الضغط المرتفع عند إزالة النفثالين (naphthalene).

غازات الفحم يتم مرورها خلال برج غسيل آخر حيث يتم الغسيل باستخدام زيت الكرى أوزوت (creosote oil) (وهو زيت معالجة الخشب) والذي يذيب البنزول (Benzol)، التولوين ومركبات أروماتية أخرى.

يتم تنقية الغاز بإزالة الكبريت وكبريتيد الهيدروجين بمروره فوق أكسيد الحديد الموجود في وحدة التنقية.



عند استنفاد Fe_2O_3 يتم سحبه من وحدة التنقية وتعريضه للهواء حيث يتأكسد إلى Fe_2O_3



غاز الفحم بذلك يكون قد تم تنقيته وتخزينه فوق خزان الغاز فوق الماء.

المكونات:

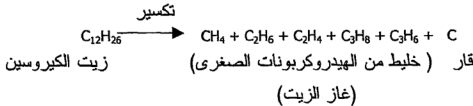
مكونات غاز الفحم هي $\text{H}_2 = 40\%$ ، $\text{CH}_4 = 32\%$ ، $\text{CO} = 7\%$ ، $\text{C}_2\text{H}_2 = 2\%$ ، $\text{C}_2\text{H}_4 = 3\%$ ، $\text{N}_2 = 4\%$ ، $\text{CO}_2 = 1\%$ ، الباقي $= 4\%$. قيمته الحرارية هي حوالي ٤٩٠٠ كيلو سعر حراري/م^٣. غاز الفحم أخف من الهواء ويحترق بلهب مدخن. إنتاجية الغاز تتوقف على درجة حرارة وطبيعة الفحم المستخدم.

الاستخدامات:

- يستخدم غاز الفحم أساسا كوقود.
- كما يستخدم في الإضاءة. قوة الإضاءة في غاز الفحم ترجع إلى وجود الهيدروكربونات الغير مشبعة.
- يستخدم كذلك في توفير جو الاختزال في مختلف العمليات الميثاليرجية.
- بسبب قيمته الحرارية العالية يستخدم كذلك في صهر المعادن. والسبائك.
- يعتبر غاز فرن الكوك أخص مادة خام لإنتاج الأمونيا.

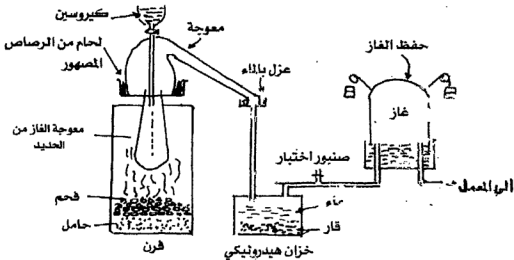
غاز الزيت: Oil Gas

الوقود الغاز يمكن كذلك الحصول عليه من تجزئة البترول. يتكون غاز زيت البترول من خليط من الهيدروكربونات ويتم تحضيره بالنكسير الحراري للكبروسين.



التصنيع: شكل (١/٢٦)

تتكون محطة المعالجة من معوجة قوية من الحديد الزهر، المحتجة في فرن الإشعال بالفحم. ذراع المعوجة (bonnet) يثبت عند فوهتها خلال عازل من الرصاص المنصهر، ويكون متصلاً بحوض هيدروليكي خلال عزل الماء. يتم تدريجياً إدخال تيار رقيق من زيت الكيروسين إلى معوجة الحديد الحمراء الساخنة، حيث يتم التسخين الشديد للزيت ويحدث له التكسير الحراري منتجاً خليط من الهيدروكربونات الصغرى مثل الميثان، الإيثان، الإيثيلين.... الخ. ينتج كذلك مواد القار (tarry) والتي نختلط مع الهيدروكربونات الغازية. الغازات التي تكونت تمر إلى الخارج خلال غطاء (bonnet) إلى الحوض الهيدروليكي. يحدث تكثف للقار وإزالته. درجة الاكتمال لعملية التكسير يتم اختبارها بسحب بعض من الغاز خلال صنوبر الاختبار ولاحظ لونه. الزيت الجيد يبدو بلون أصفر ذهبي. بضبط الإمداد بالكيروسين والهواء، يمكن الحصول على اللون المطلوب. يتم تخزين غاز الزيت في اسطوانات حفظ العار.



شكل (١/٢٦) التحضير العملي لغاز الزيت

المكونات:

متوسط مكونات غاز الزيت هو $\text{CH}_4 = 25 - 30\%$ ، $\text{H}_2 = 50 - 55\%$ ، $\text{CO} = 11\%$ ، $\text{CO}_2 = 3\%$.

القيمة الحرارية لغاز الزيت هي حوالي ٦٧٠٠ كيلو سعر حراري/ م^٣.

الاستخدام:

- يستخدم كغاز معمل.
- يستخدم كذلك لزيادة القيمة الحرارية لغاز الماء (غاز الماء المكربن).

جدول () المكونات والقيمة الحرارية للوقود الغاز

م	الوقود	متوسط المكونات	تفاعلات التصفينج	القيمة الحرارية كجول/م ^٣ حراري/م ^٣
١	الغاز الطبيعي natural gas	CH_4 ، %٩٠ - ٧٠ ، C_2H_6 =% ١٠-٥ = H_2 =%٣ البقي= CO_2 + CO ،		١٤٠٠٠ - ١٢٠٠٠
٢	غاز الإنتاج producer gas	CO =%٣٠ - ٢٢ ، H_2 =%١٢ - ٨ ، N_2 = %٥٥ - ٥٢ ، CO_2 =%3	أكسدة $\text{C} + \text{O}_2 + 3.76 \text{N}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 3.76 \text{N}_2$ $\text{C} + 1/2 \text{O}_2 + 1.88 \text{N}_2 \rightarrow \text{CO} + 1.88 \text{N}_2$ اختزال $\text{CO}_2 + \text{C} \leftrightarrow 2\text{CO}$ $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	١٣٠٠

الرقود	متوسط المكونات	تفاعلات التصنيع	القيمة الحرارية كيلو سعر حراري/م ³
غاز الماء water gas	H_2 ، %٥١ = CO ، %٤١ = N_2 = %٤ CO_2 = %٤	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	٢٨٠٠
غاز الماء المكرين ←	H_2 ، %٤٠ - ٣٨ = CO ، %٢٨ - ٢٢ = CO_2 ، %٤٨ - ٣٠ = N_2 ، %٢٠ - ١٠ = CO ، %٢٠ - ١٠ =	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ تكسير زيت ← هيدروكربونات	٣٥٠٠ - ٤٤٥٠
غاز الفحم	H_2 ، %٤٠ = CH_4 ، %٢٢ = CO ، %٧ = C_2H_2 ، %٢ = C_2H_4 ، %٣ = N_2 ، %٤ =	$Coal \xrightarrow{11200^\circ} coke + coal\ gas$	٤٩٠٠

1

م	الوقود	متوسط المكونات	تفاعلات التصلبج	القيمة الحرارية كجول/سعر حراري/م ³
١	غزل الزيت	$\text{CO}_2 = 81\%$ ، $\text{الباقي} = 4\%$ ، $\text{CH}_4 = 11\%$ ، $\text{H}_2 = 3\%$ ، $\text{CO} = 5\%$ ، $\text{H}_2 = 5\%$ ، $\text{CH}_4 = 11\%$ ، $\text{CO}_2 = 3\%$	$\text{C}_{12}\text{H}_{26} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_3\text{H}_8$ <p>تكسير</p>	١٧٠٠

الاشتعال: (combustion)

الاشتعال هو عملية كيميائية يصاحبها انطلاق حرارة وضوء. وهو بالتأكيد تفاعل منتج للحرارة (exothermic). مثال :



لأنكيد الاشتعال الكامل فإن المادة يجب أن تصل إلى درجة حرارة الاشتعال. تعرف درجة حرارة الاشتعال بأنها أقل درجة حرارة التي عندها تشتعل المادة وتنفق بدون إضافة أخرى للحرارة من الخارج.

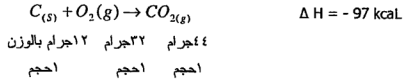
حساب الهواء اللازم للاشتعال:

كمية الأكسجين والهواء اللازم للحرق للاشتعال الكامل لكمية معينة من الوقود يمكن حسابها على أساس المبادئ الآتية:

١. يحدث دائما للمواد الاشتعال الكامل بواسطة المعرفة الجيدة للتفاعلات

الكيميائية الكلية أي أن المواد دائما تتحد بنسب محددة. فمثلا، حرق

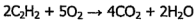
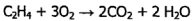
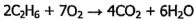
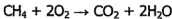
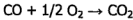
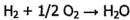
الكربون يمثل بالمعادلة الآتية:



هذه المعادلة تبين أن:

١٢ جزء بالوزن من الكربون تتحد مع ٣٢ جزء بالوزن من الأكسجين لإنتاج ٤٤ جزء بالوزن من ثاني أكسيد الكربون أو حجم واحد من الكربون يتفاعل مع حجم واحد من الأكسجين لإنتاج حجم واحد من ثاني أكسيد الكربون.

لذلك فإنه من المعادلة الكيميائية، يمكن حساب كمية الأكسجين (بالوزن أو بالحجم) يمكن حسابها بسهولة. المعادلة الكيميائية المتوازنة لمعظم مكونات أي وقود هي كالآتي:



النيتروجين أو الرماد في الوقود هي مواد غير قابلة للاشتعال ولذلك فإنها لا تستهلك الأكسجين.

٢. من الناحية العملية: يتم الاشتعال في وجود الهواء. لذلك فإنه من كمية الأكسجين المطلوبة (عند حسابها طبقاً للتفاعلات السابقة) من الهواء يمكن حسابها. أساس هذا الحساب هو حقيقة أي الهواء يحتوي على ٢١% من الأكسجين بالحجم و ٢٣% بالوزن، الباقي هو النيتروجين.

لذلك ١ م^٣ من الأكسجين يتم توفيره عن $1 \times 21/100 = ٤,٧٦$ م^٣ من الهواء، بالمثل ١ كجرام من الأكسجين يتم توفيره من $1 \times 23/100 = ٤,٣٥$ كجرام من الهواء.

٣. متوسط الوزن الجزيئي للهواء مقدر ٢٨,٩٤ جزئ^{-١} (28.94 Mol^{-1}).

٤. مكونات الوقود السائل أو الصلب عادة يعبر عنها بالوزن بينما مكونات الوقود الغاز يعبر عنها بالحجم. كتل المواد الغازية يمكن حسابها طبقاً لقوانين الغاز وقانون أفوجادرو.

أ- قانون أفوجادرو - ٢٢,٤ لتر من أي غاز عند الضغط ودرجة الحرارة القياسي (STP) أي (٢٧٣ كلفن، ٧٦٠ ملليمتر زئبق) له كتلة تساوي جزئ واحد منه. لذلك فإن الضغط القياسي ودرجة الحرارة القياسية لـ ٢٢,٤ لتر من الكربون تزن ١٢ جرام والتي هي كتلة جزئ واحد من الكربون.

ب- كتلة أي غاز يمكن تحويلها إلى حجمه عند ضغط معين ودرجة

$$PV = nRT \text{ المعادلة}$$

حيث:

$$P = \text{ضغط الغاز}$$

$$V = \text{حجم الغاز}$$

$$R = \text{ثابت الغاز}$$

$$T = \text{درجة الحرارة بمقياس كلفن}$$

$$n = \text{عدد جزيئات الغاز}$$

ج- قانون بويل وقانون شارل يمكن استخدامهما في خفض حجم الغاز عند ضغط معلوم ودرجة حرارة معلومة إلى الحجم المقابل عند أي حالة أخرى من درجة الحرارة والضغط باستخدام المعادلة:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

حيث:

T_1 ، V_1 ، P_1 هم الضغط والحجم ودرجة الحرارة الأولية للغاز ، T_2 ، V_2 ، P_2 هم الضغط والحجم ودرجة الحرارة النهائية للغاز.

(د) الأوزان النسبية لغازين أو أكثر يتم تحويلهم إلى الحجم المقابل بالعلاقة:

$$\frac{\text{الحجم النسبي للغازات}}{\text{وزن الغاز A}} = \frac{\text{وزن الغاز B}}{\text{الوزن الجزيئي للغاز B}} : \text{الوزن الجزيئي للغاز A}$$

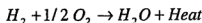
(هـ) أقل أكسجين مطلوب = الأكسجين النظري المطلوب - الأكسجين الموجود في الوقود.

أدنى أكسجين مطلوب يتم حسابه على أساس الحرق الكامل. في حالة عدم الحرق الكامل، تحتوي المنتجات على CO. في مثل هذه الحالة، يتم حساب الأكسجين الزائد بعد طرح كمية الأكسجين اللازمة لحرق CO إلى CO₂.

(و) الحرق نادرا ما يحدث بكفاءة بالحساب النظري لكمية الهواء. دائما يستخدم هواء زائد في الفرن.

$$\text{نسبة الهواء الزائد} \% = \frac{\text{الهواء الحقيقي المستخدم} - \text{الهواء النظري المطلوب}}{\text{الهواء النظري}}$$

(ز) الأكسجين الموجود في الوقود يوجد متحد مع الهيدروجين. لذلك فإن هذه الكمية من الهيدروجين المتحد مع الأكسجين الموجود في الوقود، لا تساهم في الحرق. باقي الهيدروجين يسمى الهيدروجين المتاح (available hydrogen) يساهم فقط في تفاعل الحرق.



(١٦ جرام) (٢ جرام)

حيث أن جزء واحد من الهيدروجين يتحد مع ٨ أجزاء من الأكسجين أو بمعنى آخر لكل ٨ أجزاء من الأكسجين الموجود فإنه يحدث تثبيت لجزء واحد من

الهيدروجين لذلك فإن الهيدروجين المتاح = $\frac{[وزن الهيدروجين - وزن الأكسجين]}{8}$

لذلك، فكمية الأكسجين النظرية اللازمة للحرق الكامل لواحد كيلو جرام من الوقود =

$$\left[S + \left(\frac{8}{3} - H \right) \frac{16}{12} + C \frac{32}{12} \right] \frac{100}{23}$$

حيث C ، H ، O ، S تمثل الكربون، الهيدروجين، الأكسجين، الكبريت على التوالي.

ولذلك فإن الكمية النظرية من الأكسجين اللازم لحرق واحد كيلو من الوقود =

$$\left[S \left(\frac{8}{3} - H \right) \frac{16}{2} + C \frac{32}{12} \right] \frac{100}{23} \times 32$$

أمثلة محلولة مبنية على الحرق:

مثال:

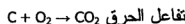
احسب وزن وحجم الهواء اللازم لحرق ٢ كجرام من الكربون.

أولاً:

الوزن الجزيئي لبعض العناصر:

$$C = 12, H_2 = 2, O_2 = 32, S = 32, H_2O = 18, N_2 = 28$$

الحل:



وزن الأكسجين المطلوب لحرق ١٢ كجرام من C = ٣٢ كجرام

إذن وزن الأكسجين اللازم لحرق ١ كجرام من C = $\frac{32}{12}$ = ٢,٦٧ كجرام

$$\text{إذن وزن الهواء المطلوب} = 2,67 \times \frac{100}{23} = 11,6 \text{ كجرام} = 11600 \text{ جرام}$$

$$\text{إذن حجم الهواء المطلوب لحرق 2 كجرام من الكربون} = \frac{11600 \times 22,4}{28,94} \text{ لتر}$$

$$= 8978,6 \text{ لتر} = 8,97 \text{ متر مكعب}$$

مثال:

احسب أدنى كمية من الهواء اللازمة للحرق الكامل لـ 100 كجرام من الوقود المحتوي على C = 80% ، H₂ = 6% ، O₂ = 5% ، S = 2% ، والباقي N₂ بالوزن.

الحل:

المكون	الكمية %	تفاعل الاحتراق	وزن O ₂ المطلوب
C	80	$\text{CO}_2 \leftarrow \text{O}_2 + \text{C}$ 12 جرام 32 جرام	$213,3 = 80 \cdot 12 / 32$
هيدروجين	6	$\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 2 جرام 16 جرام	$48 = 6 \cdot 2 / 16$
كبريت	2	$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$ 32 جرام 32 جرام	$2 = 2 \cdot 32 / 32$
أكسجين	5	- -	

النيتروجين لا يحترق ولذلك فإنه لا يستهلك أكسجين. الأكسجين المطلوب نظريا لكل

$$100 \text{ كجرام من الوقود} = 2 + 48 + 213,3 = 263,3 \text{ كجرام من O}_2$$

$$\text{الكمية الصافية المطلوبة O}_2 - \text{الموجود O}_2 = 263,3 - 5 =$$

$$258,3 \text{ كجرام من O}_2$$

$$\text{إذن الهواء المطلوب} = 258,3 \cdot \frac{100}{23} = 1123 \text{ كجرام}$$

مثال:

احسب حجم الهواء اللازم للحرق التام لواحد متر مكعب من الوقود الغاز بالمكونات:
 $\text{CO} = 48\%$ ، $\text{CH}_4 = 8\%$ ، $\text{H}_2 = 40\%$ ، $\text{C}_2\text{H}_2 = 2\%$ ، $\text{N}_2 = 1\%$ والباقي رماد.

الحل:

المكون	الكمية	تفاعل الحرق	حجم O_2 المطلوب
CO	0.48	$\text{CO} + 0.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ 1/2 جزء 1 جزء	$0.48 \times 0.5 = 0.24 \text{ م}^3$
CH ₄	0.08	$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ 2 جزء 1 جزء	$0.08 \times 2 = 0.16 \text{ م}^3$
H ₂	0.4	$\text{H}_2 + 0.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 1/2 جزء 1 جزء	$0.4 \times 0.5 = 0.2 \text{ م}^3$
C ₂ H ₂	0.02	$\text{C}_2\text{H}_2 + 5/2 \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 5/2 جزء 1 جزء	$0.02 \times 2.5 = 0.05 \text{ م}^3$

الحجم الكلي للأكسجين المطلوب = $0.24 + 0.16 + 0.2 + 0.05 = 0.65 \text{ م}^3$

حجم الهواء المطلوب = $0.65 \times 100/21 = 3.095 \text{ م}^3$

مثال:

غاز له المكونات الآتية بالحجم: $\text{CO} = 20\%$ ، $\text{CH}_4 = 4\%$ ، $\text{H}_2 = 22\%$ ، $\text{CO}_2 = 6\%$ ، $\text{O}_2 = 3\%$ ، $\text{N}_2 = 45\%$. إذا كان 20% هواء زائد مستخدم. أوجد وزن الهواء الذي يتم الإمداد به حقيقة لكل متر مكعب من هذا الغاز.

الحل:

حجم الغازات في 1 م³ هو: $\text{CO} = 20 \text{ م}^3$ ، $\text{CH}_4 = 4 \text{ م}^3$ ، $\text{H}_2 = 22 \text{ م}^3$ ، $\text{CO}_2 = 6 \text{ م}^3$ ، $\text{O}_2 = 3 \text{ م}^3$ ، $\text{N}_2 = 45 \text{ م}^3$.

المكون	الكمية	تفاعل الاحتراق	حجم O ₂ المطلوب
H ₂	٢٢	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	$0,٢٢ \times 0,٥ = 0,١١$ م ^٣
CH ₄	0.04	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$	$0,٠٤ \times ٢ = 0,٠٨$ م ^٣
CO	٠,٢	$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$	$0,٢ \times 0,٥ = 0,١$ م ^٣
CO ₂	٠,٠٦		
O ₂	٠,٠٦		
N ₂	٠,٤٥		

حجم O₂ المطلوب = $(0,١ + 0,٠٨ + 0,١) - 0,٢٦ = 0,٠٣$ م^٣

حجم الهواء المطلوب = $0,٢٦ \times 100/٢١ = 1,٢٣٨$ م^٣

الحجم الحقيقي للهواء الذي يتم الإمداد به = $1,٢٣٨ \times 100/١٢٥ = 1,٥٤٧٥$ م^٣

= 1٥٤٧,٥ لتر

الوزن الحقيقي للهواء الذي يتم الإمداد به = $22,٤/1٥٤٧,٥ \times$ الوزن الجزيئي للهواء

= $22,٤/1٥٤٧,٥ \times ٢٨,٩٤$ جرام = ٣,١٩٩٩ جرام

= 1,٩٩٩ كيلوجرام

مثال:

المكون بالحجم لعينة وقود هي: CO = ٦% ، CH₄ = ٣٠% ، H₂ = ٢٤% ، CO₂ = ٨%

، O = ٢% ، N₂ = ١٢% ، C₂H₆ = ١١% ، C₂H₄ = ٤,٥% .

ما هي الكمية النظرية من الهواء اللازمة عند ٢٥ °م، ضغط ٧٥٠ ملليمتر للحرق الكامل لمتر مكعب واحد من الوقود.

الحل:

المكون	الكمية	تفاعل الاحتراق	حجم O ₂ المطلوب
H ₂	٠,٢٤	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	$٠,١٢ = ٠,٥ \times ٠,٢٤$ م ^٣
CH ₄	٠,٣	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$	$٠,٦ = ٠,٣ \times ٢$
CO	٠,٠٦	$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$	$٠,٠٣ = ٠,٥ \times ٠,٠٦$ م ^٣
CO ₂	٠,٠٨	—	—
O ₂	٠,٠٢	—	—
N ₂	٠,١٢	—	—
C ₂ H ₆	٠,١١	$C_2H_6 + 3.5 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 3 H_2O$	$٠,٣٨٥ = ٣,٥ \times ٠,١١$
C ₂ H ₄	٠,٠٤٥	$C_2H_4 + 3 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 2 H_2O$	$٠,١٣٥ = ٣ \times ٠,٠٤٥$
C ₄ H ₈	٠,٠٢٥	$C_4H_8 + 6 O_2 \rightarrow 4 CO_2 + 4 H_2O$	$٠,١٥ = ٦ \times ٠,٠٢٥$

إجمالي الحجم المطلوب من الأكسجين للحرق =

$$٠,٠٢ - ٠,١٥ + ٠,١٣٥ + ٠,٣٨٥ + ٠,٦ + ٠,٠٠٣ + ٠,٠١٢ =$$

$$= ١,٤ \text{ م}^٣ \text{ عند الضغط ودرجة الحرارة العادية.}$$

حجم الأكسجين المطلوب عند درجة الحرارة والضغط المعطى

$$P_1 = ٧٥٠ \text{ مليمت}$$

$$P_0 = ٧٦٠ \text{ مليمت}$$

$$V_1 = ?$$

$$V_0 = ١,٤ \text{ م}^٣$$

$$T_1 = ٢٩٨ \text{ كلفن}$$

$$T_0 = \text{كلفن}$$

$$V_1 = ١,٤ \times ٧٦٠ \times ٢٩٨ / ٧٥٠ = ١,٥٤٨ \text{ م}^٣$$

$$\text{الحجم المطلوب من الهواء} = ١,٥٤٨ \times ١٠٠ / ٢١ = ٧,٣٧١ \text{ م}^٣$$

مثال:

عينة من الفحم وجد أن لها المكونات الآتية:

$$C = 75\%, H = 5.2\%, O = 12.1\%, N = 3.2\%, \text{رماد} = 4.5\%.$$

١. احسب أقل كمية مطلوبة من الهواء للحرق الكامل لواحد كيلوجرام من الفحم.
٢. احسب أعلى قيمة حرارية وأقل قيمة حرارية لعينة الفحم (إجمالي القيمة الحرارية بالكيلو سعر حراري/ الكيلو جرام): $C = 80.80, H = 34500, S = 2240$.

الحل:

$$١. \text{الكيلوجرام من الفحم يحتوي: } C = 750 \text{ جرام, } H = 52 \text{ جرام, } O = 121$$

$$\text{جرام, } N = 32 \text{ جرام, الرماد} = 45 \text{ جرام.}$$

أدنى وزن من الهواء مطلوب للحرق الكامل للكيلوجرام من الفحم

$$= \text{وزن لـ } [C \times (12/32) + H \times (2/16) - O \times (8/16)] \times (23/100)$$

$$= [750 \text{ جرام} \times (12/32) + H \times (2/16) - 121 \text{ جرام}] \times (23/100)$$

$$= [2000 \text{ جرام} + 416 \text{ جرام} - 121 \text{ جرام}] \times (23/100)$$

$$= 2295 \text{ جرام} \times (23/100) = 9978 \text{ جرام} = 9978 \text{ جرام}$$

$$٢. \text{أعلى قيمة حرارية} =$$

$$= 100/1 \times [80.80 \times C + 8 \times H \times (O/8) + 2240 \times S] \text{ كيلو}$$

سعر/كجرام

$$= 100/1 \times [80.80 \times 750 + 8 \times 52 \times (12/8) + 2240 \times 0] \text{ كيلو}$$

سعر/كجرام

$$= 100/1 \times [127219 + 60600] \text{ كيلو سعر/كجرام}$$

أقل قيمة حرارية = (أعلى قيمة حرارية - $0.09 \times H \times 0.87$) كيلوسعر/ كجرام

$$= (7332 - 0.09 \times 0.2 \times 0.87) \text{ كيلو سعر/ كجرام}$$

$$= 7057 \text{ كيلو سعر/ كجرام.}$$

تحليل الغاز العادم (Analysis of Flue Gases)

الغاز العادم هو الغاز الناتج من حرق الوقود في الأفران والمحارق. عند تمام الحرق، يتكون الغاز العادم من CO_2 ؛ بخار الماء، نيتروجين، أكسجين زائد. مصطلح الغاز العادم مشتق من مصرف الغازات الذي يؤدي بالغازات إلى المدخنة (flue).

للحصول على الحرق الكامل للوقود، يكون من المهم وجود التصاق جيد بين الوقود مع كمية كافية من الهواء، لحرق كل المادة القابلة للاحتراق تحت الظروف المناسبة. تحليل الغازات العادمة يعطى فكرة حول عملية الحرق الكاملة أو الغير كاملة. عادة يتم قياس نسب CO_2 ، CO ، O_2 في الغازات العادمة. أحيانا يتم كذلك تعيين N_2 ، H_2 والهيدروكربونات.

- إذا أظهر التحليل وجود CO ، فإن هذا يبين الحرق الغير كامل للوقود أو أن هناك نقصا في الأكسجين. لذلك فإنه عندئذ يزداد الإمداد بالأكسجين.
- إذا أظهر تحليل الغاز وجود نسبة عالية من الأكسجين في الغاز العادم فإن هذا يظهر أنه بالرغم من تمام الحرق إلا أنه يوجد زيادة في الإمداد بالأكسجين. زيادة الكبيرة من الهواء تسبب الفقد في الحرارة. في مثل هذه الحالات، فإن الإمداد بالهواء إلى الوقود يتم إيقافه لمدة قصيرة أو أن يتم زيادة معدل الإمداد بالوقود.
- إذا أظهر التحليل وجود كميات كبيرة من O_2 ، CO_2 ، فإن هذا يبين أن الحرق غير منتظم وغير متجانس أي في بعض أجزاء من الفرن يوجد هواء زائد وفي بعض الأجزاء الأخرى يكون الإمداد بالهواء غير كافي.

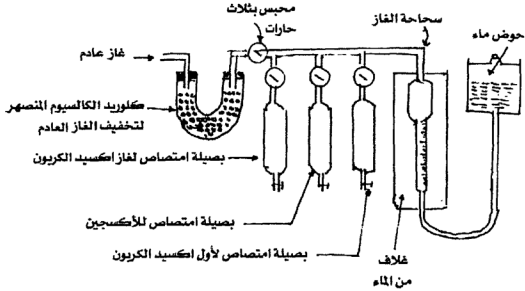
تحليل الغاز يتم باستخدام جهاز أورسات Or.sat'Apparatus

جهاز أورسات: شكل (١/٢٧)

يتكون جهاز أورسات من أنبوبة أفقية لها محبس ذو ثلاث حارات عند أحد النهايات. النهاية الأخرى من الأنبوبة الأفقية تكون متصلة بسحاحة مدرجة. السحاحة تكون محاطة بغلاف من الماء وذلك للمحافظة عليها عند درجة حرارة واحدة. النهاية السفلى للسحاحة يتم توصيلها بحوض ماء بواسطة ماسورة مطاطية طويلة. مستوى الماء في حوض الماء يمكن رفعه أو خفضه برفع أو خفض حوض الماء.

الأنبوبة الأفقية تكون متصلة على التوالي بمجموعة من ثلاث بصيلات امتصاص C, B, A. (absorbion bulbs). كل منها خلال محبس إيقاف (stop cock). بصيلات الامتصاص بها محاليل لامتصاص CO, O₂, CO₂ على التوالي.

- البصيلة (A) تحتوي على محلول (KOH) لامتصاص CO₂ (٢٥٠ جرام من KOH مذابة في ٥٠٠ سم^٣ من الماء المقطر، ثم غليه لطرده أي CO₂ موجود به).
- البصيلة (B) تحتوي على محلول من حامض بيروجاليك (alkaline pyrogallic acid) لامتصاص O₂ (٢٥ جرام من حامض البيروجاليك + ٢٠٠ جرام من KOH في ٥٠٠ سم^٣ من الماء المقطر).
- البصيلة (C) تحتوي على كلوريد النحاسوز النشادري (ammoniacal cuprous chloride) لامتصاص CO (١٠٠ جرام من كلوريد النحاسوز + ١٢٥ سم^٣ من محلول الأمونيا + ٣٧٥ سم^٣ من الماء).



شكل (١/٢٧) جهاز أورسات

العمل:

١. يتم تنظيف كل الجهاز بإتقان. يتم تشحيم المحابس واختبارها بالنسبة للإحكام ضد تسرب الهواء. بصيالات الامتصاص يتم ملئها بمحاليلها المتتالية وقفلها بواسطة محبس القفل (stop cock). يتم ملء غطاء الماء وحوض الماء بالمادة.
٢. محبس الهواء ذو الثلاث حارات يتم فتحه إلى الجو ويتم ملء السحاحة تماماً بالماء وذلك يرفع حوض الماء لإزالة الهواء الموجود في السحاحة.
٣. يتم الآن توصيل المحبس ذو الثلاث حارات بالغازات العادمة لتحليلها خلال (أنبوب $CaCl_2 - U$) والذي يمتص الرطوبة الموجودة في الغاز العادم. يتم خفض حوض الماء ليسمح بدخول الغاز العادم إلى السحاحة. ولكن هذا العادم يتم طرده إلى الجو بفتح المحبس ذو الثلاث حارات ورفع الحوض حيث أنه مخلوط بالهواء الموجود في الجهاز. يتم تكرار هذه العملية ٣ - ٤ مرات لتأكيد الإزالة الكاملة للهواء الموجود في الجهاز.

٤. أخيراً، يتم امتصاص الغاز في السحاحة ويتم ضبط حجم الغاز العادم إلى ١٠٠ سم^٣ عند الضغط الجوي. يتم ذلك بضبط ارتفاع حوض ضبط المنسوب. يتم فتح المحبس ذو الثلاث حارات إلى الجو ورفع حوض الماء بحرص، حتى يصل منسوب الماء فيه بنفس منسوب الماء في البصيلة الذي يكون عند ١٠٠ سم^٣. يتم عندئذ قفل المحبس.

٥. الآن يتم فتح المحبس للبصيلة (A) ويتم مرور الغاز العادم خلال المحلول الموجود فيها برفع حوض الماء. CO₂ الموجود في الغاز العادم يتم امتصاصه بمحلول (KOH). يتم ثانياً إرسال الغاز إلى السحاحة وتكرار العملية عدة مرات لتأكيد تمام امتصاص CO₂ بمحلول (KOH)، وذلك برفع وخفض حوض الماء. الغازات التي لم يتم امتصاصها أخيراً تؤخذ إلى السحاحة بواسطة رفع السائل في البصيلة (A) حتى تمتلئ تماماً. بعد ذلك يتم قفل محبس البصيلة (A). يتم أخذ قراءة حجم الغاز المتبقي في السحاحة بتسوية منسوب الماء في السحاحة وفي حوض الماء. الخفض في الحجم يعطي حجم (CO₂) في ١٠٠ سم^٣ من عينة الغاز العادم.

٦. الآن يتم فتح محبس البصيلة (B). يتم تكرار عملية الامتصاص كما في البصيلة (A). حجم الغاز الممتص يعطي حجم O₂ في ١٠٠ سم^٣ من عينة الغاز العادم. بالمثل يتم مرور الغاز العادم خلال البصيلة (C)، لتعيين كمية (CO) الموجودة في الغاز العادم. الغاز المتبقي في السحاحة بعد الامتصاص لكل من CO, O₂, CO₂ يؤخذ كنيتروجين.

إحتياطات:

١. المحلول في البصيلة B (pyrogalllic acid) يمكن كذلك أن يمتص CO بالإضافة إلى O₂ والمحلول في البصيلة C يمكن أن يمتص الغازات الثلاث CO₂, O₂, CO. لذلك يكون من الضروري أن يتم أولاً مرور الغازات العادمة خلال محلول حامض البيروجاليك السحاحة B حيث يتم فقط امتصاص O₂ (حيث CO₂ تم

امتصاصه سابقا بالمحلول في البصيلة (A) وأخيرا خلال محلول كلوريد النحاسوز النشاردي البصيلة C، حيث يتم امتصاص CO فقط.

٢. يتم تعيين CO بحرص حيث أن نسبته عادة صغيرة. في كل تفاعلات الحرق، توجد علاقات محددة بين أوزان الوقود المحروق، الهواء المستخدم والغازات العادمة المتكونة. حيث أن مكونات الهواء المستخدم تعتبر عادة أنها متجانسة، فإن العلاقة بين الكميات الثلاث يمكن حسابها. لذلك إذا كانت أحجام أي اثنين من الآتي تكون معلومة، فإنه يمكن حساب الثالث.

- مكونات الوقود.
- مكونات الغاز العادم.
- طبيعة الاحتراق (سواء تام أو غير تام وأي هواء زائد استخدم).

سائل رقميه مبنية على تحاليل الغاز العادم:

النقط الآتية يجب تذكرها عند حل المسائل المبنية على تحليل الغاز، بالإضافة إلى النقطة السابق مناقشتها:

١. عند وجود CO في الغاز العادم، فإن كمية O_2 اللازمة لحرقه يجب استنتاجها من الأكسجين الحر، قبل حساب الهواء الزائد.

$$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$$

لكل جزئ من CO يلزم $1/2$ جزئ من O_2 .

فمثلا، تحليل الغاز العادم لوقود أعطى $CO_2 = 14\%$ ، $O_2 = 4\%$ ، $CO = 2\%$ ، $N_2 = 80\%$ ، عندئذ إجمالي الأكسجين المستخدم يمكن حسابه من كمية N_2 في الغاز العادم أي:

$80 \times 21/79 = 26.58$ جزئ (الهواء يحتوي على 21% أكسجين، 79% نيتروجين بالحجم). الأكسجين الزائد يتم حسابه بطرح الأكسجين المطلوب لحرق CO

من كمية الأكسجين الموجودة في الغاز العادم.

الأكسجين الزائد = $4 - (2 \times \frac{1}{2}) = 3$ جزئ.

$$\%12.72 = 100 \times \frac{3}{(3 - 26.58)}$$

٢. وزن الغاز العادم الجاف يتم حسابه بموازنة الكربون في الغاز العادم والكربون الموجود في الوقود.

٣. مكونات الغاز العادم عادة تعطى على أساس الجفاف وعلى أساس حجمي باستثناء النص على غير ذلك.

مثال:

احسب أدنى وزن من الهواء يلزم للحرق الكامل لكل كيلو جرام من الفحم له المكونات الآتية بالوزن:

$$C = 90\% , H_2 = 3.5\% , O_2 = 3\% , S = 0.5\% , N = 0.5\%$$

رماد = 1.5%

احسب نسبة المكونات بالوزن لنواتج الحرق الجاف.

الحل:

واحد كيلو جرام من الفحم يحتوي على:

$$C = 0.9 \text{ كيلوجرام} , H_2 = 0.035 \text{ كيلو جرام} , O_2 = 0.03 \text{ كيلو جرام} ,$$

$$S = 0.005 \text{ كيلو جرام} , N = 0.005 \text{ كيلو جرام}$$

المكون	الكمية في ١ كجرام من الوقود	تفاعل الحرق بالجرام	كمية O_2 كجرام	كمية المنتج الجاف كجرام
كربون	٠,٩	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ 12 ٢٢	$٢,٤ = ٠,٩ \times ١٢/٣٢$	$٢,٣ = ٠,٩ \times ١٢/٤٤$
هيدروجين	٠,٠٣٥	$(٢) H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$ 1٨ 16	$٠,٢٨ = ٠,٠٣٥ \times ٢/١٦$	
أكسجين	٠,٠٣	—	—	
كبريت	٠,٠٥	$S + O_2 \rightarrow SO_2$ ٣٢ ٦٤	$٠,٠٥ = ٠,٠٥ + ١٢/٣٢$	$٠,٠١ = ٠,٠٥ \times ٣٢/٦٤$
نيتروجين	٠,٠٥	—	—	

الأكسجين اللازم لحرق واحد كيلو جرام من الوقود = $(٠,٠٥ + ٢,٨ + ٢,٤) - ٠,٣ = ٢,٦٥٥$ كجرام

إنزن الهواء المطلوب = $٧٣/١٠٠ \times ٢,٦٥٥ = ١,٩٤$ كجرام

كمية المنتجات الجافة:

كمية CO_2 = $٢,٣$ كجرام

كمية SO_2 = $٠,٠١$ كجرام

كمية N_2 = ٧٧% من الهواء المستخدم + N_2 الموجودة في الوقود

١,٤٩

$$\text{إذن كمية المنتجات الجافة} = 3,3 + 0,1 + 0,005 + (11,04 \times 77/100) = 12,2 \text{ كجرام}$$

نسبة المنتجات الجافة:

$$\%CO_2 = 100 \times 3,3/12,2 = 27\%$$

$$\%SO_2 = 100 \times 0,1/12,2 = 0,8\%$$

$$\%N_2 = 100 \times 8,891/12,2 = 72,9\%$$

مثال:

عينة من الفحم تحتوي على:

$$C = 60\%, O_2 = 6\%, N_2 = 2\%, \text{رماد} = 28\%.$$

احسب النسبة المئوية لمكونات نواتج الحرق الجافة، بفرض استخدام هواء زائد بنسبة 40%.

الحل:

المكون	الكمية الموجودة في ١ كجرام من الوقود	تفاعل الحرق	كمية O ₂ (في كجرام)	كمية المنتجات الجافة
كربون	٠,٦	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$1,6 = 0,6 \times 12/32$	$2,2 = 0,6 \times 12/44$
هيدروجين	٠,٠٤	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	$0,28 = 0,04 \times 2/16$	
أكسجين	٠,٠٦	—	—	—
N ₂	٠,٠٢	—	—	—

$$\text{كمية الأكسجين المطلوبة} = 1,6 + 0,32 - 0,06 = 1,86 \text{ كجرام}$$

$$\text{كمية الهواء} = 1,86 \times 100/23 = 8,087 \text{ كجرام}$$

$$\text{كمية الهواء المستخدمة حقيقيا} = 8,087 \times 140/100 = 11,322 \text{ كجرام}$$

$$\text{الهواء الزائد} = 11,322 - 8,087 = 3,235 \text{ كجرام}$$

كمية منتجات الحرق الجافة:

$$2,2 = \text{كمية } \text{CO}_2$$

كمية $\text{O}_2 = \text{الأكسجين في الهواء الحر الذي يبدو في الحالة الحرة في الغاز العادم} =$

$$0,744 = 100/23 \times 3,235 \text{ كجرام.}$$

كمية $\text{N}_2 = \text{N}_2$ من الوقود + N_2 من الوقود المستخدم.

$$= 0,02 + (100/77 \times 11,322) = 8,738 \text{ كجرام}$$

إجمالي وزن المنتجات الجافة = $2,2 + 0,744 + 8,738$ كجرام

$$= 11,682 \text{ كجرام}$$

$$\% \text{CO}_2 = \frac{100 \times 2,2}{11,682} = 18,83\%$$

$$11,682$$

$$\% \text{O}_2 = \frac{100 \times 0,744}{11,682} = 6,37\%$$

$$11,682$$

$$\% \text{N}_2 = \frac{100 \times 8,738}{11,682} = 74,79\%$$

$$11,682$$

مثال:

وقود غاز له المكونات الآتية بالحجم:

$$\text{H}_2 = 20\% , \text{CH}_4 = 25\% , \text{C}_2\text{H}_6 = 16\% , \text{C}_2\text{H}_4 = 9,5\% ,$$

$$\text{Butane} = 2,5\% , \text{CO} = 4\% , \text{CO}_2 = 8\% , \text{O}_2 = 4\% , \text{N}_2 = 12\% .$$

احسب الهواء المطلوب للحرق التام لواحد متر مكعب من هذا الغاز. إذا كان استخدام

الهواء بنسبة زيادة 50%، أو التحليل الحجمي لنواتج الحرق الجافة.

الحل:

المكون	الكمية في m^3 من الوقود	تفاعل الحرق	حجم الأكسجين m^3	حجم المنتجات الجافة m^3
H_2	$0,2$	$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{m}^3 0,1 = 0,5 \times 0,2$	—
CH_4	$0,75$	$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	$0,5 = 2 \times 0,25$	$0,75 = 1 \times 0,75 = \text{CO}_2$
CO_2	$0,08$	—	—	
O_2	$0,04$	—	—	
N_2	$0,12$	—	—	
C_2H_6	$0,11$	$\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	$0,51 = 3,5 \times 0,11$	$0,32 = 2 \times 0,11 = \text{CO}_2$
C_2H_4	$0,095$	$\text{C}_2\text{H}_4 + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	$0,285 = 3 \times 0,095$	$0,19 = 2 \times 0,095 = \text{CO}_2$
C_4H_8	$0,075$	$\text{C}_4\text{H}_8 + 6 \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$	$0,45 = 6 \times 0,075$	$0,1 = 4 \times 0,025 = \text{CO}_2$

حجم الأكسجين المطلوب = $0,1 + 0,5 + 0,56 + 0,285 + 0,15 + 0,2 - 0,4 = 1,755$ متر مكعب

حجم الهواء المطلوب = $1,755 \times 100/21 = 8,357$ متر مكعب
 الحجم الحقيقي المطلوب من الهواء = $8,357 \times 100/150 = 12,54$ م³
 الهواء الزائد = $8,357 - 12,54 = 4,183$ متر مكعب
 حجم منتجات الحرق الجافة:

حجم CO₂ محسوباً من نواتج الحرق = $0,25 + 0,32 + 0,1 + 0,04 = 0,9$ متر مكعب

إجمالي حجم CO₂ = $0,9$ م³ + CO₂ الموجود في الوقود = $0,9 + 0,08 = 0,98$ م³
 حجم N₂ = 79% من الهواء المستخدم + N₂ في الوقود =

$$= (100/79 \times 12,54) + 0,12 = 10,03 \text{ م}^3$$

$$\text{حجم O}_2 = \text{الهواء الزائد} \times 21/100 = 4,183 \times 21/100 = 0,878 \text{ م}^3$$

$$\text{إجمالي حجم النواتج الجافة} = 0,98 + 0,03 + 0,878 = 11,888 \text{ م}^3$$

$$\text{CO}_2\% = 0,98 / 11,888 \times 100 = 8,24\%$$

$$\text{N}_2\% = 10,03 / 11,888 \times 100 = 84,37\%$$

$$\text{O}_2\% = 0,878 / 11,888 \times 100 = 7,38\%$$

مثال:

نسبة مكونات الفحم وجد أنها:

C = 54% ، H = $6,5\%$ ، O = 3% ، N = $1,8\%$ ، رطوبة = $17,3\%$ والباقي رماد. عند حرق هذا الفحم بالهواء الزائد أعطى $21,5$ كجرام من الغازات العادمة الجافة لكل كيلو جرام من الفحم المحروق. احسب نسبة الهواء الزائد المستخدم في الحرق.

الحل:

المكون	الكمية لكل كجم من الوقود	تفاعل الحرق	كمية O ₂ كجم	كمية المنتجات الجافة كجم
H ₂	٠,٠٦٥	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	$٠,٥٢ = ١٢/١٦ \times ٠,٠٦٥$	—
O ₂	٠,٠٣	—	—	—
N ₂	٠,٠١٨	—	—	—
C	٠,٠٤	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$١,٤٤ = ١٢/٣٢ \times ٠,٠٤$	$١,٩٨ = ١٢/٤٤ \times ٠,٠٤$

كمية الأكسجين المطلوب = $٠,٣ - ٠,٥٢ + ١,٤٤ = ١,٩٣$ كجمكمية الهواء المطلوب = $٢٣/١٠٠ \times ١,٩٣ = ٨,٣٩$ كجم

كمية المنتجات الجافة باستخدام أقل كمية من الهواء =

$$٨,٤٥٨٣ = (١٠٠/٧٧ \times ٨,٣٩) + ٠,٠١٨ + ١,٩٨$$

بفرض أن كمية الهواء الزائد = x

$$\text{إن } ٢١,٥ \text{ كجم} + ٨,٤٥٨٣ = x \text{ كجم}$$

$$\text{إن } x = ٨,٤٥٨٣ - ٢١,٥ = ١٣,٠٤٢ \text{ كجم}$$

$$\text{إن نسبة الهواء الزائد} = ١٠٠ \times ٨,٣٩/١٣,٠٤٢ = ١٥٥,٤\%$$

مثال:

فحم يحتوي على الآتي:

$$C = ٦٢,٤\% , H = ٤,١\% , O = ٦,٩\% , N = ١,٢\% , S = ٠,٨\% , \text{ رطوبة} = ٥١,١\% , \text{ رماد} = ٩,٧\%$$

تسم حرق هذا الفحم بالطريقة حيث كان محتوى الغازات الجافة هو $CO_2 = ١٢,٩\%$ ،
 $CO = ٠,٢\%$ ، $O_2 = ٦,١\%$ ، $N = ٨٠,٨\%$.

احسب الآتي:

أ- الوزن النظري للهواء اللازم لكل كيلو جرام من الفحم.

ب- الوزن الحقيقي للهواء المستخدم.

جـ- وزن الغازات العادمة الجافة المنتجة لكل كجم من الفحم

الحل:

المكون	الكمية في كجم من الوقود	كمية O ₂ بالكيلوجرام	كمية الغازات العادمة الجافة بالكيلوجرام
H ₂	٠,٠٤١	$٠,٣٢٨ = ١٢/١٦ \times ٠,٠٤١$	—
O ₂	٠,٠٦٩	—	—
N ₂	٠,٠١٢	—	—
C	٠,٦٢٤	$١,٦٦٤ = ١٢/٣٢ \times ٠,٦٢٤$	$٢,٢٨٨ = ١٢/٤٤ \times ١,٦٢٣$
S	٠,٠٠٨	$٠,٠٠٨ = ٢٣/٢٣ \times ٠,٠٠٨$	$٠,٠١٦ = ٣٢/٦٤ \times ٠,٠٠٨$
H ₂ O	٠,٥١	—	—

كمية الأكسجين المطلوب = $١,٦٦٤ + ٠,٣٢٨ + ٠,٠٠٨ - ٠,٠٦٩ = ١,٩٣١$ كجم

كمية الهواء المطلوب = $٣٢/١٠٠ \times ٢,٠٠٣ = ٨,٣٩٦$ كجم

الآن الأكسجين اللازم لتحويل ٠,٠٠٢ كجم من CO الموجود في الغاز العادم إلى

$CO_2 = ٢٨/١٦ \times ٠,٠٠٢ = ٠,٠٠١١٤$ كجم

إن الزيادة في الأكسجين/ كجم من الغاز العادم = كمية الأكسجين في الغاز العادم -

كمية الأكسجين اللازمة لتحويل CO إلى $CO_2 = ٠,٠٠١١٤ - ٠,٠٦١ = ٠,٠٥٩٨$ كجم

كجم

كمية الكربون / كجم من الوقود:

$(وزن CO_2 \times ١٢/٤٤) + (وزن CO \times ١٢/٢٨) = (٠,١٢٩ \times ٤٤/١٢) + (٠,٠٠٢)$

$\times ٢٨/١٢ = ٠,٣٦٠٤$ كجم

إن ٠,٣٦٠٤ كجم من الكربون توجد في ١ كجم من الغاز العادم

$٠,٦٢٤$ كجم من الوقود توجد في $٠,٦٢٤/٠,٣٦٠٤ = ١٧,٣١٤$ كجم من

الغاز العادم

(الكربون في غاز الوقود، والكربون في الغاز العادم يجب أن يكونا متوازنان)

كمية الغاز العادم لكل ١ كيلو جرام من الفحم المحترق = ١٧,٣١٤ كجرام

وزن الأكسجين الزائد في الغاز العادم = $١٧,٣١٤ \times ٠,٠٥٩ = ١,٠٣١٩$ كجرام

إنن الهواء الزائد = $١,٠٣١٩ \times ٢٣/١٠٠ = ٤,٤٨٩$ كجرام

عندئذ وزن الهواء الحقيقي الذي تم استخدامه = $[٨,٣٩٦ \text{ (النظري)} + ٤,٤٨٧ \text{ (الزائد)}]$ كجرام

= ١٢,٨٨٥ كيلو جرام.

الباب الثاني

2

الأفران Furnaces

●● محتويات الباب :

الفصل الأول : الأفران

Furnaces

الفصل الثاني : استعادة الحرارة العادمة في الأفران

الفصل الثالث : الانتقال الحراري في الأفران

الفصل الرابع : تقسيم الأفران

الفصل الخامس : حسابات الميزان الحراري للمفرن

الفصل الأول

1

الأفران

مقدمة: أنواع الأفران:

الفرن هو الجهاز الذي يتم فيه تحويل الطاقة الكيميائية للوقود أو الطاقة الكهربائية إلى حرارة والتي تستخدم لرفع درجة حرارة المواد، التي تسمى الحمل أو الشحنة الموجودة في داخله لهذا الغرض. الأفران التي تعمل عند درجة حرارة منخفضة تسمى عادة (ovens) طبقا للغرض منها. يوجد كذلك أفران أخرى تستخدم في درجات الحرارة العالية لأغراض مختلفة. عند التعامل مع صناعات السيراميك فإن الأفران عندئذ تسمى (kilns). الزجاج يتم صهره في أحواض (tanks) كما تستخدم مصطلحات أخرى لهذا الغرض، مثل جهاز التلييد (sintering) المستخدم في التذهيب (dressing) الميتالرجي للخام.....الخ.

التقسيم:

أ- يمكن تقسيم الفرن إلى الآتي:

- نوع الدفعة الواحدة batch type
- النوع المستمر continuous type

- نوع التسخين المباشر.
- نوع التسخين غير المباشر.

ب- أنواع الأفران الميتالرجية هي:

- فرن البوتقة crucible
- فرن المجرمة - المجرمة المكشوفة (hearth furnace)
- المحولات: بسمر، النفخ الجانبي - أو العلوي (LD)
- فرن لافع (إحماء خارجي) muffle furnace
- وعاء السقي (soaking pits)
- أفران إعادة التسخين.
- أفران التلدين (annealing)

ج- أنواع أخرى من الأفران:

- الفرن الدوار cementkiln
- فرن الغلاية tunnelkiln
- الأفران الكهربائية - ذات المجال الواحد أو الثلاثي.
 - التسخين بمقاوم معدني (resistor)
 - التسخين بالحث الكهربائي (induction)

طاقة التسخين لفرن الدفعة الواحدة Batch Type

عادة يعبر عن طاقة التسخين لفرن بوزن المعدن الذي يمكن تسخينه في وحدة الزمن إلى درجة حرارة محددة عند أدنى نقطة باردة للشحنة وبدون التسخين الزائد لباقي الشحنة. نظرا لأن تكاليف الفرن تتناسب مع حجمه، فإن طاقة التسخين لوحدة الحجم تكون هامة.

يعبر عن طاقة الكثافة النوعية بأي من:

$$\blacksquare \text{ الوزن للشحنة للتسخين / (ساعة} \times \text{ حجم الفرن) أو}$$

▪ الوزن للشحنة للتسخين / (ساعة × مساحة المجرمة)

تتوقف طاقة التسخين على عدة عوامل، مثل معدل انطلاق الحرارة، معدل انتقال الحرارة إلى الشحنة، معدل التوصيل لأبرد نقطة في الشحنة وغيره كثيرا.

تأثير معدل انطلاق الحرارة:

يعبر عن معدل انطلاق الحرارة بوحدات الحرارة المنطلقة في وحدة الحجم في وحدة الزمن. الوحدة هي كيلو كالوري/ المتر الكعب × الساعة. قريبا من معدل انطلاق الحرارة ومتعلق به هو التعبير طول اللهب (flame length). بالنسبة لأفران الجمرية المكشوفة وأحواض الزجاج، فإن طول اللهب يعني المسافة بين الموقد والنقطة حيث ينطفئ اللهب (أي يصبح غير متوهج". بالنسبة للأفران الصناعية، طول اللهب يعني المسافة بين الموقد والنقطة التي فيها يكون الاحتراق تام بنسبة ٩٥% في اللهب القصير. في حالة الوقود الغازي والهواء في حالة خلط الهواء قبل الموقد (الخلط المسبق)، يحدث الحرق بسرعة أعلى، ويلزم حجم احتراق أقل مقارنة بالخلط داخل الفرن وفي حالة التسخين المسبق لهواء الحرق فإن الحرق يتقدم بسرعة أكبر.

بالإضافة إلى كمية الحرارة المنطلقة في وحدة الحجم ووحدة الزمن فإن درجة الحرارة التي تنطلق عندها تؤثر على طاقة الفرن. كل جزئ من عناصر الحرق عند درجة حرارة اللهب النظرية وتنقل حرارة التفاعل نحو الأغراض المحيطة (غازية، سائلة وصلبة) مع استمرار الحرق. يمكن الوصول إلى درجة حرارة اللهب النظرية فقط في حالة الحرق السريع اللانهائي أو بالحرق في غرفة محكمة الغلق ضد الحرارة وهذه لا تكون مرتفعة بالنسبة للوقود الضعيف.

في حالة الوقود الضعيف يمكن زيادة درجة الحرارة فقط بالتسخين المسبق للهواء أو الوقود أو كليهما. زيادة الأكسجين في الهواء كذلك تزيد من درجة حرارة اللهب.

تأثير معدل امتصاص الحرارة بواسطة الشحنة:

يلاحظ أنه في الأفران الصناعية عندما يمكن إطلاق كمية الحرارة المناسبة عند درجة حرارة مرتفعة، فإن طاقة الفرن تتوقف على معدل الانتقال الحراري إلى الشحنة والذي يعتمد على العوامل التالية:

- درجة حرارة حوائط الفرن عند إدخال الشحنة الباردة.
- درجة الحرارة المطلوب تسخين الشحنة إليها.
- درجة حرارة نواتج الحريق.
- إنبعاثية (emissivity) نواتج الحريق.
- إنبعاثية الحوائط.
- إنبعاثية تسخين الشحنة.
- النسبة بين مساحة الشحنة إلى مساحة الحائط.
- سمك طبقة نواتج الحريق.
- التوصيل الحراري للشحنة (بما فيها الفراغات).
- تجانس درجة الحرارة المطلوبة في المنتج.
- سمك شحنة التسخين.
- حجم الفرن (مساحة المجمرة والحجم).
- سرعة الغازات في الفرن.

عموماً انتقال الحرارة إلى الشحنة يحدد طاقة التسخين لشحنة التسخين الدقيقة، بينما تساوي درجة الحرارة خلال الشحنة يحدد طاقة التسخين للشحنة السمكة ذات التوصيل الحراري المنخفض.

تأثير تنظيم الشحنة:

تنظيم الشحنة وسمكها له تأثير واضح عند تسخين القطع. يجب توفير الفراغ بين القطع لمقاطع المناولة. في حالة عدم وجود فراغ (فواصل) كبيرة بين القطع، فإن طاقة التسخين لا تتأثر بدرجة جيدة، ذلك لأن النقاط الغازية للمجرة تتقبل الإشعاع من

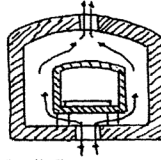
القواعد وكذلك من السقف والحوائط الجانبية. الإشعاع من المجمرة (والتي ليست ساخنة مثل السقف) تزيد انتقال الحرارة إلى الأسطح الرأسية.

تأثير سمك الشحنة:

إذا كان حجم الجسم صغير مقارنة بالانتقال الحراري لسطحه، فإن الجسم يمكن تسخينه بسرعة ولكن مع اختلاف صغير في درجة الحرارة ما بين السطح والجوف (core). عند تسخين الصلب للدرفلة (rolling) أو للطرق (forging). فإن التطبيق العملي ينتبه قليلاً نحو حقيقة أ، زمن. الإنضاج الحراري (soaking time) يجب أن يزداد بسرعة أكبر عن القطر أو سمك الشحنة شريطة أن القطر لا يزيد عن ٣٠ سم وأن الحرارة تستقبل بانتظام من كل الأجناب. عند تسخين مقاطع كبيرة من الصلب المطاوع، فإن الإمداد الحراري يكون عالياً في المراحل الأولى ويقل عندما يصل سطح الشحنة إلى درجة الحرارة النهائية المطلوبة.

الفرن الملافح أو فرن الإحماء الخارجي: (Muffle Furnace)

الغرض الرئيسي للإحماء الخارجي هو لحماية الشحنة من تأثير نواتج الحريق. الغرض الآخر هو لتسوية الحرارة الموجودة في جانب الحرق مع حائط اللفح. طاقة التسخين لللفح المحيط بالشحنة تتوقف على السطح والقدرة الانبعاثية للشحنة وعلى خواص حائط اللفح (درجة الحرارة، المساحة، الانبعاثية). بالنسبة لمجموعة العوامل لهذه المتغيرات فإن طاقة التسخين أقل قليلاً عن تلك لفرن اللهب المباشر (ذو نفس درجة حرارة الحائط) بسبب عدم وجود نواتج الحريق التي تكون أكثر سخونة عن حائط الفرن شكل (٢/١).



نواتج الحريق

شكل (٢/١) فرن لافح

الفرق الكبير في درجة الحرارة على كل جانب لحائط اللفح المصنوع من الطفل الحراري لا يقلل فقط طاقة التسخين لللفح وكذلك يسبب كذلك أن تخرج نواتج الحريق عند درجة حرارة عالية جدا. بسبب هذين السببين فإن حوائط اللفح تعمل رقيقة بدرجة عملية ويمواد لها كلا من التوصيل الحراري والتحمل ضد درجة الحرارة العالية. من بين أكثر المواد مناسبة للاستخدام في حوائط اللفح هو كلا من الصلب السبيكة، كربيد السيليكون. لا تستخدم الأفران اللافحة لتسخين المعادن لأكثر من ١٠٠٠ °م بسبب تكاليف الصيانة. أفران لافح مشابهة تستخدم كأفران معملية والتي يتم تسخينها كهربيا.

الأفران ذات درجة الحرارة المنخفضة:

(Low Temp Furnaces and Ovens)

في حالة الأفران ذات درجة الحرارة المنخفضة فإن الانتقال الحراري بالإشعاع يكون أقل نسبيا عن الأفران ذات درجة الحرارة لمرتفعة. عند درجة حرارة ١٢٣٠ °م فإن وحدة المساحة تشع ١٦ ضعف تلك الحرارة التي يتم إشعاعها عند درجة حرارة ٤٧٦ °م. معدل الانتقال الحراري بالحمل الحراري في الاتجاه الرأسى (convection) يزداد بزيادة مع زيادة الكثافة وزيادة السرعة للمجال المتدفق. تزداد سرعة المجال المتدفق إما بالفعل النفث (jet action) للهواء الزائد أو في معظم الحالات بالمرأوح الساخنة. يتم وضع حد للسرعة بالموامعة ما بين التجانس على

جانب مع تكاليف الطاقة وحالة الشحنة على الجانب الآخر، الإنبعائية تكون أحد العوامل. زيادة لمعان الشحنة، يعني أعلى سرعة قصوى. الطاقة للمروحة تتحول إلى حرارة. انتقال الحرارة بالحمل الرأسي يتحدد طبقا لمعامل الانتقال الحراري (قيمة المعامل يجب تأكيدها). بعد معرفة المعامل، يمكن حساب زمن التسخين في المكان حيث الالتصاق الأول للغازات الساخنة مع الشحنة.

طاقة التسخين للأفران المستمرة (Meating Capacity of Coninuous Fur)

في الأفران المستمرة تتحرك الشحنة باستمرار وبطريقة منقطعة خلالها. يمكن دفع الشحنة أو دحرجتها أو قد توضع على مجمرة دوارة أو أن تعلق على ناقل علوي. الفرن المستمر يمكن تسخينه بحيث أن تكون درجة الحرارة لنواتج الحرق ثابتة عمليا في أي مكان في الفرن.

طاقة التسخين للأفران المستمرة يمكن أن تزيد عن تلك للأفران ذات الدفعات (batch type) والتي لها نفس مساحة المجرمة لأن درجة الحرارة يجب خفضها في أفران الدفعات لمنع حدوث التسخين الزائد. في الفرن المستمر درجة الحرارة يمكن أن تكون مرتفعة جدا إذا أزيلت الشحنة الرقيقة بسرعة. وفي حالة الشحنة السميكة فإنه توجد منطقة إحماء كافية للحصول على تساوي درجة الحرارة في كل المقاطع.

أفران اللهب الأمامي المستمر (Front Fired Continous Furnaces)

طاقة التسخين لهذه الأفران تتحدد طبقا لمتوسط فرق درجة الحرارة بين نواتج الحرق والشحنة وهي أقل في الأفران حيث تكون درجة الحرارة منتظمة. الحرق الأمامي له عيوب في أن معدل الانتقال الحراري يكون عند أعلاه في المكان حيث تكون درجة حرارة سطح الشحنة عند أعلاه.

اللهب الأمامي من القمة والقاع (Front Firing Top and Bottom)

الطاقة الحرارية للأفران وحرارة القاع هي أقل من ضعف ذلك في الحالة السابقة، لأن منطقة الإحماء يجب إعدادها لإبعاد النقط السوداء التي كانت بسبب ريش

مواسير مياه التبريد. أقصى معدل هو حوالي ٤٦٠ كجرام/سم^٢ × الساعة مع درجة حرارة الفرن ١٢٩٠ °م ونسبيا أقل للشحنة الثقيلة جدا. هذه القيم يمكن أن تزداد بتغيير موافد اللهب القصير واللهب الطويل. الأخير يمكن زيادته بدرجة الحرارة العالية للفرن.

اللهب الجانبي (Side Firing)

طاقة التسخين للأفران المستمرة تزداد عموما بإضافة لهب في المسافة المتوسطة أو لهب جانبي إلى نهاية اللهب. بهذه الطريقة يمكن زيادة الطاقة بحوالي ٥٠%. أفران تسخين الألواح ذات معدلات ٧٣٠ كجرام/ المتر المربع × الساعة للصلب منخفض الكربون. طاقة التسخين للأفران المستمرة تتغير كثيرا مع طبيعة وحالة شحنة التسخين. الصلب عالي الكربون لا يتم تسخينه لدرجة حرارة عالية كما هو بالنسبة للصلب منخفض الكربون وذلك لتجنب إزالة الكربون. حيث النتيجة أن طاقة التسخين تنخفض.

حدود طول المجرمة بدفع الشحنة:

العامل الآخر الذي يحد من طاقة الأفران المستمرة من نوع الدفع بالنسبة لكمية التسخين في وحدة الزمن ولكن ليس بنسبة التسخين لوحدة المساحة في وحدة الزمن. والعامل هو المعروف بالطول الآمن للمجرمة (safe length of hearth) . الطول الآمن يتوقف على استواء المجرمة، سمك الشحنة، وشكل الأسطح الملتصقة للشحنة. الاقتصاديات أو كفاءة عند الاستخدام بالشكل الواقعي بالنسبة للأفران الصناعية، هو دليل لتكاليف التسخين لوحدة الوزن للمنتج النهائي. تكاليف التسخين تشمل ليس فقط تكاليف الوقود ولكن كذلك تكاليف إشعال الفرن، تكاليف الصيانة والإصلاح، وتكاليف إيجاد مجال للحماية وتكاليف الأجزاء التالفة أو المحروقة. ويشمل كذلك تكاليف التشغيل الميكانيكي لهذه القطع والتي عند التفتيش يكون بها العيوب الناتجة عن التسخين الغير مناسب.

مع كثير من البنود التي تدخل في تكاليف التسخين، يكون من الممكن في بعض الحالات أن يكون الوقود الأعلى سعرا هو الأوفر اقتصاديا. بينما تتراوح كفاءة أفران الغلايات ما بين ٦٠ - ٩٠% أو أكثر قليلا فإن كفاءة الأفران في الاستخدامات الميتاليرجية قد تنخفض أحيانا إلى حوالي ١٠% في نوع الاحتراق، ولكنها تكون أعلى قليلا في النوع الكهربائي. مع الظروف المناسبة ومع التصميم الجيد والتشغيل الجيد فإن كفاءة الفرن حتى ٦٠% أو أعلى من ذلك يمكن تحقيقها ولكن مثل هذه القيم المرتفعة تعتبر استثناء وليس قاعدة.

الكفاءة تعني بها كفاءة الوقود والتي هي النسبة بين الحرارة الداخلة إلى الشحنة إلى الحرارة الكلية للوقود. أحد الأسباب لاختلاف الكفاءة بين الغلايات والأفران الصناعية هو في درجة الحرارة النهائية للمادة التي يتم تسخينها. الغازات يمكن أن تعطي حرارة للشحنة طالما أنها أسخن من الشحنة. وبالتالي، فإن الغازات العادمة تترك الفرن الصناعي عند درجة حرارة عالية جدا. وهذا العامل هو المسئول عن انخفاض كفاءة الفرن.

الوقود اللازم للحرق يتم حرقه في منطقة الحرق للفرن. إنه يكون المطلوب أن معظم الحرارة الناتجة تنقل إلى الشحنة ولكن الحرارة تذهب في مكان آخر. بعض منها يمر إلى حائط الفرن والمجرة، والبعض الآخر يفقد في الوسط المحيط بالإشعاع والتوصيد الحراري من الأسطح الخارجية للحوائط أو بالتوصيل نحو الأرض. كذلك تشع الحرارة خلال الشقوق أو الفتحات الأخرى وتمر غازات الفرن إلى الخارج حول الباب، وأحيانا تحرق في الفتحة حاملة الحرارة إلى الخارج. كذلك تفقد الحرارة في كل وقت يكون الباب فيه مفتوحا. شكل آخر من فقد الحرارة هو من خلال الشحنة. أخيرا معظم الفقد في الحرارة يمر إلى الخارج مع نواتج الحرق، إما في شكل حرارة محسوسة أو كعدم إتمام الاحتراق. تتطلب اقتصاديات الوقود أن يكون الجزء الأكبر من الحرارة الذي يمر بالشحنة يكون أكبر ما يمكن وأن تكون كل الحرارة المفقودة أقل ما يمكن.

العوامل المؤثرة على اقتصاديات الوقود في الفرن:

العوامل المختلفة المؤثرة على اقتصاديات الوقود في الأفران الصناعية هي كالآتي:

- الاحتراق الكامل مع أدنى هواء زائد.
- التوزيع الجيد للحرارة.
- العمل عند درجة الحرارة المطلوبة.
- خفض الفقد في الحرارة من فتحات الفرن.
- خفض فقد الحوائط.
- السيطرة على تيار السحب.
- استغلال أقصى طاقة.
- استعادة الحرارة المفقودة من غازات الفرن العادمة.

الحرق الكامل مع أدنى هواء زائد:

للحصول على الحرق الكامل للوقود مع أدنى هواء زائد فإنه يلزم مراعاة عدد من العوامل (مثل الاختيار المناسب والصيانة للتحكم، رصد الهواء الزائد، ضغط تغلغل هواء الحرق). قيمة فقد الحرارة مع مختلف كميات الهواء في حالة حمل غازات الفرن العادمة بعيدا عن ٩٠٠ °م موضحة في الجدول التالي.

نسبة الهواء الزائد	نسبة إجمالي الحرارة التي تحملها الغازات العادمة بعيدا (درجة حرارة الغازات العادمة ٩٠٠ °م)
٢٥	٤٨
٥٠	٥٥
٧٥	٦٣
١٠٠٠	٧١

بالإضافة إلى الزيادة الغير عادية في الفقد الحراري مع زيادة الهواء الزائد، فإن دخول هواء زائد بكمية كبيرة يخفض من درجة حرارة اللهب وبالتالي يقلل درجة

حرارة الفرن ومعدل التسخين. في حالة استخدام زيادة صغيرة جدا من الهواء، فإن الاحتراق سوف لا يكون تاما وغازات المدخنة سوف تحمل وقود غير محترق في شكل غازات غير محترقة مثل أو أكسيد الكربون، الهيدروجين والهيدروكربونات الغير محترقة والتي كان يمكن أن تحرق في غرفة الاحتراق.

التوزيع الجيد للحرارة:

من الناحية المثالية فإن الفرن يجب أن يصمم بحيث أن يتم في وقت معين تسخين حجم معين من المادة إلى درجة حرارة متجانسة مع أدنى معدل لحرق الوقود. لتحقيق ذلك يجب مراعاة النقاط التالية:

- يجب ألا يمس اللهب الشحنة وأن ينتشر بحرية لأي غرض صلب. أن إعادته مهما تكن تحقيق ترميز حبيبات الوقود بما يؤثر على الحريق وإيجاد دخان أسود. في حالة التصاق اللهب بالشحنة سيزداد الفقد للفقشور (scale losses) عدة مرات.
- الحراريات يتم استخلاص الأملاح منها (leached) في حالة التصاق اللهب لأي جزء من الفرن، لأن نواتج الاحتراق الغير كامل يمكن أن تتفاعل مع بعض مكونات الحراريات عند درجة حرارة اللهب العالية.
- اللهب من مختلف المواقف في فراغ الحرق يجب كذلك أن يظل صافيا (وبعيدا) عن بعضه البعض. في حالة تقاطع اللهب من مختلف المواقف سيحدث احتراق غير كفاء. يمكن التحكم في هذا بوضع موائد الحرق في الحوائط المتعاكسة بطريقة تبادلية (staggering).
- اللهب لديه استعداد للتحرك بحرية في فراغ الحرق فوق المادة مباشرة في أفران إعادة التسخين الصغيرة، لا يتم وضع محور الموقد موازي للمجرة ولكن دائما بزاوية علوية. تؤخذ جميع الاحتياطات لتجنب حدوث تصادم للهب مع السقف.

المواقد الكبيرة تنتج لهب طويل والذي قد يصعب احتواءه خلال حوائط الفرن. زيادة المواقد ذات طاقة أقل توفر توزيع أفضل للحرارة في الفرن. وكذلك تقلل من فقد القشور وتزيد من عمر الخدمة للفرن.

- في حالة أفران إعادة التسخين الصغيرة يتضح استمرار اللهب الطويل باللون الذهبي الأصفر عند حرق زيت الفرن لتجانس التسخين. يجب ملاحظة أن اللهب يجب ألا يكون طويلا جدا ليتمكن دخول المدخنة أو الخروج من الأبواب أو من أعلا. يحدث هذا عند حرق وقود زائد لزيادة معدل الإنتاج.

الجزء الكبير للوقود الإضافي المحروق يخرج من المدخنة كحرارة مفقودة. لذلك ينصح باحتواء اللهب خلال الفرن.

- يفضل كذلك توفير حجم الحريق المناسب لمعدل انطلاق الحرارة. كقاعدة عامة، في حالة أفران التسخين باللهب المباشر، فإن انطلاق الحرارة الذي يعادل ٧٠٠ - ٩٠٠ كيلو كالوري/ الساعة في المتر المكعب من حجم الاحتراق يمكن استخدامه.

العمل عند درجة الحرارة المطلوبة:

بالنسبة لأي عملية تسخين أو صهر صناعية، توجد أقصى درجة حرارة لتشغيل الفرن.

التشغيل عند درجة حرارة مرتفعة جدا، لا يعني فقط فقد في الوقود في شكل حرارة، ولكن يسبب كذلك التسخين الزائد للشحنة، وإفسادها أو الأكسدة الزائدة وإزالة الكربون هذا بالإضافة إلى الإجهاد الزائد على الحرارية. يمكن تشغيل الفرن بدون أي تحكم في درجة الحرارة، ذلك بواسطة الفتح والقفل والذي يكون بالغ الضرر بالنسبة لتحقيق الكفاءة العالية للفرن. في حالة القفل (off) يدخل فقط الهواء إلى الفرن بما يعمل على خفض درجة حرارته سريعا، حيث عند إعادة تشغيل حرق الوقود فإن كمية الوقود اللازمة لرفع درجة الحرارة تكون أكثر كثيرا من الضرورية عند تشغيل الفرن بالتحكم النسبي.

خفض الفقد الحراري من فتحات الفرن:

في أفران حرق الوقود يوجد فقد كبير في الحرارة خلال فتحات الفرن. فلكل فتحة كبيرة يمكن حساب الفقد في الحرارة بتقدير إشعاعات الأجسام عند درجة حرارة الفرن وضرب هذه القيمة مع الإنبعاثية (emissivity) (والتي عادة ٠,٨ لأفران الطوب)، ومعامل الإشعاع خلال الفتحات. يجب قفل جميع الفتحات الغير ضرورية في الفرن مع احتواء اللهب خلال الفرن. الأبواب يجب أن تكون مقفلة بإحكام ومصنوعة من مادة خفيفة لها قدرة تحمل ومقاومة للحرارة. الأبواب بالمفصلات أو المتأرجحة يمكن استخدامها. لخفض الفقد في الحرارة، فإن التبطين الحراري يجب أن يكون سميك بما فيه الكفاية وله خاصية عزل جيدة. لخفض الإجهاد وكذلك لتأكيد سهولة قفل الفتحات، يمكن استخدام أبواب الرفع العمودية التي يتم اتزانها بثقل مقابل (counter weight).

خفض فقد الحوائط:

حوالي من ٣٠ - ٤٠% من الوقود المستخدم في الفرن عموماً يكون في شكل حرارة مفقود في الأفران المستمرة أو المتقطعة. الاختيار المناسب للحراريات ومواد العزل الحراري يحقق وفر كبير في وقود الأفران الصناعية. مواد متعددة ذات خصائص العزل الحراري والاستمرارية يجب أخذها في الاعتبار لخفض الفقد الحراري خلال حوائط الفرن. استخدام الحراريات العازلة ذات النوعية المناسبة والسبك المناسب يمكن أن يقلل من طاقة التخزين الحراري للحوائط، وكذلك الوقت اللازم لوصول الفرن إلى درجة حرارة التشغيل بنسبة تصل إلى ٦٠ - ٧٠% في الأفران التي تعمل بطريقة متقطعة (Intermittent). مواد العزل يعود الانخفاض في التوصيل الحراري لها للمسام، بينما المقاومة الحرارية تعتمد على الوزن لوحدة الحجم للمادة الصلبة وكذلك حرارتها النوعية. يوجد ثلاث أنواع من طوب العزل:

- منتجات من (diatomaceous earth) التراب الدياتومي.
- منتجات من الديدان vermiculite
- حراريات (الطفل الحراري أو السيليكا) ومنتجاتها تعرف بحراريات العزل وتستخدم في التبطين الداخلي في الفرن.

توجد طريقتين للعزل تستخدم للأفران ذات درجة الحرارة العالية. عند عمل الفرن باستمرار تحت ظروف شاقة من الجو أو من درجة الحرارة، فإنه يتم وضع تغطية من عزل التراب الدياتومي خلف قاعدة الحراري الكثيف. في عوازل أخرى حيث الظروف أقل حدة ودرجة الحرارة أقل، وخاصة في الأفران المنقطعة ذات الدورة القصيرة، فإن مادة العزل نفسها يمكن أن تكون التبطين الحراري بدون أي ظهور من الطوب الحراري. المواد من النوع الأخير تكون من الحراريات ذات المسامية العالية ولها قوة جيدة ومقاومة التشطي، ويمكن عموماً استخدامها في المجال حتى ١٨٠٠ °م. نوع آخر من المواد (شعيرات السيراميك) ذات التوصيل المنخفض جداً، ووزن خفيف جداً، ذات القدرة على تحمل الصدمات الحرارية يمكن استخدامها كذلك في الأفران المنقطعة.

التحكم في سحب تيار الهواء للفرن: (Control of Furnace Draught)

في أي فرن، دخول الهواء بدون سيطرة وتحكم يجب منعه. وهو يؤدي إلى استمرار ضغط زائد قليلاً داخل الأفران لتجنب تغلغل الهواء. الأفران الضخمة، وخاصة تلك ذات مدخنة السحب تكون مجهزة بتجهيزات الإحساس بالضغط وقرأته والتي إما أن توقف أو تغذي غاز الحماية للفرن.

عند درجة حرارة الفرن، الأكسجين يحدث التآكل العادية مكوناً الأكاسيد أو القشور. أول أكسيد الكربون والهيدروجين يختزل الأكاسيد المعدن. الجو المساعد على الاختزال (زيادة الوقود) يكون أكاسيد أقل من تلك التي تتكون بفعل الجو المؤكسد (زيادة الهواء) ولكن القشور (الأكاسيد) تكون ملتصقة جيداً. في الجو المؤكسد تتكون القشور بكمية أكبر ولكن يكون من السهل إزالتها.

في حالة وجود ضغط سالب في الفرن فإنه يحدث ارتشاح هوائي خلال الشقوق والفتحات بما يؤثر على التحكم في نسبة الهواء إلى الوقود. إهمال ضغط الفرن يمكن أن يعني مشاكل المعدن البارد وعدم تجانس درجة حرارة المعدن والذي يمكن أن يؤثر فيما بعد على العمليات مثل الطرق، الدرفلة والذي يترتب عليه زيادة في استهلاك الطاقة.

ضغط الفرن يكون ثابتاً في مختلف أجزاء الفرن. مستوى الصفر في الفرن هو المستوى الذي يكون عنده ضغط الفرن مساوياً للضغط الجوي. لقد لوحظ أن أننى استهلاك للوقود يحدث عند ضغط عالي للفرن، أكثر من ذلك اللازم للمحافظة على مستوى الصفر عند المجمرة. ترجع هذه الظاهرة إلى سابق الترشيح (exfiltration) . وسابق الترشيح أقل خطورة من الرشح. بعض المشاكل المتعلقة بسابق الترشيح تكون خارج اللهب، التسخين الزائد لحراريات الفرن يؤدي إلى خفض عمر الطوب، زيادة الصيانة للفرن، احتراق مسارات الهواء والمعدات الملصقة بالفرن....الخ.

استغلال أقصى طاقة

عند التصميم الأولي للفرن يكون الهدف هو الحصول على الفرن الصحيح للمهمة المطلوبة أي سواء كان الفرن من النوع المستمر أو من النوع المرحلي. في حالة التغذية المستمرة للشحنة عند أحد النهايات والسحب من الطرف الآخر عندئذ ستزداد الكفاءة الكلية مع استرجاع الشحنة من منتجات الغاز العادم. في حالة عدم إمكان استخدام فرن مستمر، عندئذ يكون من المهم التخطيط بحرص لسحب الأحمال من أفران الدفعة الواحدة. يتم تفريغ الفرن فوراً ما أمكن (خلال الحدود الميثاليرجية والحدود الأخرى) لإمكان استخدام الحرارة المتبقية في الفرن.

تحميل الفرن: (Furnace Loading)

أحد العوامل الهامة ذات التأثير على الكفاءة هي تحميل الفرن. يوجد تحميل معين الذي عنده يعمل الفرن عند أقصى طاقة حرارية. في حالة التحميل الغير تام

للفرن، فإنه سيتم استغلال جزء بسيط من الحرارة المتاحة في غرفة العمل بواسطة الحمل وبذلك ستتخفض الكفاءة.

أقصى تحميل يتم الحصول عليه بالمحاولات، مع ملاحظة أن وزن المادة في كل شحنة، الوقت اللازم للوصول إلى درجة حرارة معينة وكمية الوقود المستخدم. يجب الحرص نحو تحميل الفرن بالمعدل المقابل لأقصى كفاءة، ذلك رغم حقيقة أن هذه المحددات نحو تحقيق ذلك قد يتعارض أحيانا ببعض العوامل بخلاف التحكم في العمل.

استهلاك "عدم التحميل" لاستمرار فرن المرحلة الواحدة البسيط عند ١٣٠٠ °م عندما يكون فارغا هو حوالي ٧٠% لذلك اللازم للعمل عند أقصى معدل تحميل. تنسيق الحمل على مجمرة الفرن يجب تنظيمه بحيث:

- أن يستقبل أقصى إشعاع من الأسطح الساخنة لغرفة التسخين والأفران.
- الغازات الساخنة يتم تدويرها بكفاءة حول الأسطح المستقبلية للحرارة.
- يجب أن يكون هناك فواصل بين الشحنات. تطابق المواد ينتج عنه عدم تجانس الحرارة ويجب تجنبه.

يجب عدم وضع الشحنة في الأماكن التالية:

- في الممر المباشر للمواقد أو حيث احتمال حدوث تصادم مع اللهب.
- في المناطق حيث التي من المحتمل أن تسبب انسداد أو إعاقة لنظام تيار الغاز العادم للفرن.

- قريبا من فتحات الأبواب حيث يحتمل حدوث نقاط باردة.

لاقتصاديات الوقود ونوعية الشغل يجب أن تظل المواد المتضمنة للحمل في الفرن

أدنى وقت محدد للحصول على المتطلبات الطبيعية والميتاليرجية.

عند وصول المادة لهذه الصفات فإنه يجب سحبها من الفرن لتجنب التلف وفقد في الوقود. في حالة تسخين الصلب، القاعدة العامة هي أن الحرارة تسري ٣ ملليمتر في

خسة دقائق. في حالة القضبان الأسطوانية، المربعة معدل التسخين المحدد مسبقاً هو ٢٠ دقيقة لكل ٢٥ ملليمتر من قطر الصلب المطاوع، ٤٠ دقيقة لكل ٢٥ ملليمتر لصلب السبيكة. ولتوليد الصلب (annealing) يلزم ٦٠ دقيقة لكل ٢٥ ملليمتر من القطر أو السمك. القيم السابقة تنطبق على الأفران حيث حجم الشحنة يكون صغيراً نسبياً بالنسبة لحجم الفرن.

يجب تشغيل الفرن عند أقصى طاقة للحصول على أفضل اقتصاديات للوقود وذلك باختيار الحجم المناسب والنوع المناسب للفرن ونظام تداول المواد. التوقف من آن إلى آخر في ماكينات الإنتاج يجعل الفرن عاطلاً لفترة زمنية طويلة، وبذا يسبب استهلاك زائد في الوقود. يمكن تحقيق الاقتصاد بجمع الشحنات المتتالية المناسبة مع التشغيل المستمر للفرن عند أقصى تحميل اقتصادي ثم الإيقاف التام كلية لفترة زمنية في حالة عدم توفر الشغل الكافي. عند التوقف يجب التخلص من كل مصادر تسرب الهواء.

استعادة الحرارة من الغازات العادمة:

في أي فرن صناعي تترك نواتج الاحتراق الفرن عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الشحنة. الفقد الحراري المحسوس في الغازات العادمة، عند ترك المدخنة، تحمل من ٣٥ - ٥٥% من دخل الحرارة للفرن. كلما زادت كمية الهواء الزائد ودرجة حرارة الغاز العادم، كلما زاد احتمال الفقد في الحرارة. يمكن استعادة الحرارة الملموسة في الغازات بواسطة:

- التسخين المسبق للشحنة.
- التسخين المسبق لهواء الحرق.

هذا بجانب أنه توجد تقنيات لاستعادة الحرارة المفقودة قبل توليد البخار من خلال غلايات الحرارة المفقودة، نظم تربية الغاز، امتصاص البخار، نظم التبريد.... الخ

الاستعادة المباشرة للطاقة من الغازات العادمة يمكن تحقيقها في الأفران

الميتاليرجية بالتسخين المسبق للمواد الداخلة. يتوقف تأثير التسخين المسبق للشحنة على الأبعاد والخواص الطبيعية للمادة المطلوب تسخينها بجانب طرق التداول المستخدمة.

الفرن المستمر من نوع الدفع يمكن تشغيله باستخدام الحرارة المفقودة وذلك بالتسخين المسبق للشحنة. في حالة بطء معدل التسخين، فإن معظم الحرارة التي تكتسبها الشحنة تكون عند الطرف الساخن، ونواتج الحريق يمكن أن تقوم بالتسخين المسبق للكتل المعدنية بطينة التحرك. يعمل الاستفادة من فقد الوقود بدرجة كبيرة بالتسخين المسبق لهواء الحرق، بالمسترجع والمولد.

فوائد هواء الاحتراق الساخن هي:

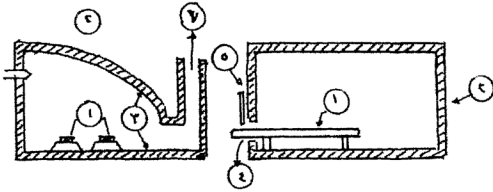
- يوفر في استهلاك الوقود.
- زيادة درجة حرارة اللهب.
- تحسين الاحتراق.
- خفض معدل التسخين الأولي.
- الخفض في فقد القشور.

في المسترجع يحدث التبادل الحراري ما بين الغازات العادمة والهواء خلال الحوائط المعدنية أو من السيراميك. على الجانب الآخر في المولد، يمر كلا من الغازات العادمة والهواء المطلوب تسخينه مسبقا بالتبادل خلال مجال تخزين الطاقة، بما ينتج عنه الانتقال الحراري.

توزيع الحرارة في الفرن: شكل (٢/٢)، شكل (٢/٣)

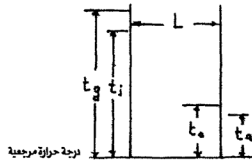
معظم الحرارة تنطلق في منطقة الاحتراق عند اليسار وتتحرك من هناك نحو اليمين. الحرارة المتولدة بهذا يتم امتصاصها (١) بواسطة الشحنة و الذي هو المطلوب. ولكن الحرارة تذهب كذلك إلى أماكن أخرى حيث بعضها يذهب إلى حوائط الفرن وبعضها إلى المجرمة (٣) بما يزيد حرارة هذه الأجزاء. جزء آخر من الحرارة

يفقد بالإشعاع والحمل الحراري من الأسطح الخارجية للحوائط أو بالحمل الحراري نحو الأرض (٢). تنبع الحرارة بعيدا خلال الشقوق أو الفتحات الأخرى (٤). وتمر غازات الفرن إلى الخارج حول الباب. (٥) أحيانا الحرق المكشوف مع حمل الحرارة. تفقد الحرارة في كل وقت يكون فيه الباب مفتوحا. تفقد الحرارة من الأجزاء الطويلة المعدنية والتي يكون جزء منها خارج الفرن (٦). أخيرا الفقد الحراري إلى الخارج مع منتجات الحريق و (٧) إما في شكل حرارة ملموسة أو كحرارة مختزنة بسبب عدم الاحتراق الكامل.



شكل (٢/٢) توزيع الحرارة في الفرن

t_g = درجة حرارة ناتج الحرق
 t_i = درجة حرارة السطح الداخلي للفرن
 t_o = درجة حرارة السطح الخارجي للفرن
 t_a = درجة حرارة الهواء



شكل (٢/٣) الحرارة في الفرن

الحرارة المفقودة من حوائط الفرن أو فقد الحائط:

الحرارة المفقودة من خارج حوائط الفرن هي أحد الظواهر الهامة ذات التأثير على اقتصاديات الأفران. فقد من الحوائط أثناء التشغيل المستمر والغير منقطع يختلف عن فقد لنفس الفرن في حالة تشغيله بطريقة متقطعة.

الفقد الحراري من الحائط أثناء التشغيل المنتظم:

للسريان المنتظم للحرارة خلال الحائط، تستخدم الحالات كما في الشكل (٢/٨). درجة حرارة نواتج الحريق تزيد عن درجة حرارة سطح الحائط. فقد الحراري للحوائط من الطفل الحراري المدموك أقل من فقد الحراري بالطوب الحراري الكثيف لأن التوصيل الحراري للطفل اللدن يكون بعد الجفاف والحرق في الموقع حوالي ٦٠% من التوصيل للطوب الحراري الكثيف. تسرب الغاز يزيد من فقد الحائط ولكن يكون من الخطأ إضافة فقد الحائط بالتوصيل لأن التسرب يزيد درجة حرارة الوجه البارد للحائط وبذا يقلل من تسرب الحرارة بالتوصيل. فقد الحرارة بالتوصيل (conduction) وبالتسرب (leakage) يمكن خفضها بإحاطة الفرن بغلاف من الصلب. فقد في وحدة المساحة يكون أكبر كثيراً قرب الأطراف عنه قرب المركز .

الفقد من الحائط أثناء التشغيل المتقطع:

في التطبيقات العملية حيث زمن التشغيل يتغير بدون انتظام مع زمن التوقف. أثناء فترة التوقف، فإن الحرارة المختزنة في الحرارية أثناء فترة التشغيل يتم فقدها بالتدريج أساساً بالإشعاع والحمل الحراري (convection) من السطح البارد. بالإضافة إلى أن بعض الحرارة يفقد بواسطة تدفق الهواء خلال الفرن. تشتت الحرارة المختزنة هو خسارة، لأن الحرارة المفقودة هي على الأقل تنقل جزئياً إلى الحراري أثناء فترة التشغيل التالية.

في حالة التشغيل لمدة قصيرة بين فترات توقف طويلة، فإن تلك الحوائط على الحرارية العازلة تكون مفضلة، لأن قليل من الحرارة مختزن فيها. فقد في الحرارة

بشنت الحرارة المختزنة في الحراريات يتم تعيينه بوقت التشغيل ووقت التوقف. إذا كان الفرن يعمل لمدة ٢٤ ساعة كل ثالث يوم. عمليا كل الحرارة المختزنة في الحراريات تفقد ولكن إذا كان الفرن يعمل ٨ ساعات كل يوم فإنه ليس كل الحرارة المختزنة في الحراريات يتم انتشارها وتشتتها.

الفقد في الحرارة بالإشعاع خلال الفتحات:

الطوب الأحمر الداخلي يشع كم كبير من الحرارة مثل الأجسام السوداء خلال الشقوق المتسعة أو الضيقة وفتحة الباب.

الفقد في الحرارة بتسرب الغاز:

الفقد في الحرارة بسبب غازات الفرن الخارجة من الصعب تقديرها. تسرب الغاز له تأثير واضح عن فقد الحرارة من الحائط. في حالة الأبواب المحكمة، فإن الفقد يجب أن لا يزيد عن ٢% من كل الحرارة المنتجة في الفرن. في حالة الأبواب الغير محكمة وحيث اللهب أو نافورات الغازات الساخنة الموجهة نحو الأبواب قد تصل بسهولة إلى ٨% وقد تزيد عن هذه الكمية.

الفقد في الحرارة في حالات خاطئة:

الفقد في الحرارة بسبب بروز جزء من الشحنة خارج الفرن: يحدث الفقد في الحرارة بسبب انتشار الحرارة من جزء المعدن خارج الفرن وفي الهواء. خلال الفترة الزمنية للتسخين، فإن الحرارة تتدفق من الجزء الذي في الفرن إلى الجزء خارجه، حيث جزء من هذه الحرارة ينتشر من الجزء الخارجي بالإشعاع والحمل الحراري.

الفقد في الحرارة إلى الملقاط (Tongs) وماكينات الشحن:

الملقاط البارد يمتص الحرارة عند وجوده في الفرن. الملقاط دائما يكون باردا عند دخوله الفرن ذلك إما لتبريده بالمياه أو لوجوده في حوض ماء. رغم أن تدفق الحرارة إلى الملقاط أقل من الحرارة التي يتم إشعاعها خلال الأبواب المفتوحة إلى أنها تعتبر كبيرة. الحرارة المنقولة إلى الملقاط هي نتيجة (١) السطح المعرض للملقاط (٢)

الفترة الزمنية التي يوجد خلالها الملقاط داخل الفرن (٣) معامل الإشعاع.

الفقد في الصواني، سلاسل النقل والبكر:

عدم العناية بهذا البند كان السبب في عدم قدرة الفرن على تحقيق الطاقات واستغلال استهلاك الوقود. الصواني أو أي حاويات أخرى عادة تحصل على نفس درجة الحرارة مثل الشحنة وكمية الحرارة التي تخرج بها من الفرن يمكن تقديرها من وزنها ومن بيان المحتوى الحراري.

الحرارة التي تحمل خارج الفرن بواسطة نواتج الحرق:

في أفران الحرق، يحدث نوعين إضافيين من الفقد في الحرارة. هذا الفقد يكون بسبب الطاقة الحرارية التي تأخذها نواتج الاحتراق خارج الفرن في شكل وقود غير محترق وفي شكل حرارة ملموسة بسبب درجة الحرارة المرتفعة.

الكفاءة الحرارية:

تحقيق الكفاءة الحرارية العالية يكون مطلوباً في كل عمليات التسخين. هذا يعني أن السرعات الحرارية المتاحة في الوقود يجب أن توجه كلها ما أمكن ذلك نحو الشحنة مع أقل فقد في الحرارة نحو المجال المحيط وبعد تحقيق التأثير الحراري المطلوب على الشحنة فإنه يجب إعادة استخدامها لغرض آخر ما أمكن ذلك. أحد الطرق لخفض معدل الفقد في الحرارة نحو المجال المحيط هو باستخدام العزل أو الحشو والتبطين للفرن. ما بين الغرفة الساخنة والحائط الخارجي. استخدام العزل يتم عمله جيداً حيث درجة الحرارة المنخفضة أو المتوسطة تستخدم في خطوط البخار، وأفران المعالجة الحرارية الصغيرة التي تعمل على دفعات. (batch)، ولكن يكون عملياً في الوحدات ذات درجات الحرارة المرتفعة إلى حد ما مثل المسترجعات (recuperators)، أفران الفخار، وبعض أفران المعالجة الحرارية وخاصة في حالة استخدام التسخين بالانتقال الحراري بالتدفق المعاكس.

الفصل الثاني

2

استعادة الحرارة العادمة في الأفران

Waste Heat Recovery in Furnaces

الميزان الحراري في الأفران:

في حالة الأفران والغلايات، يتم الإمداد بالطاقة في شكل حرارة إما للشحنة لتسخينها إلى المستوى المطلوب أو للماء لإنتاج البخار بالنوعية المطلوبة، على التوالي. الميزان بين الكتلة والطاقة الحرارة مبني على قوانين المحافظة على الطاقة والكتلة. لذلك، فإن كلا من المادة والطاقة الداخلة في العملية يأتي بدون أي فقد إما في نفس الشكل أو في غيره. بالنسبة للمفاعلات النووية هذه الحقيقة ليست صحيحة، حيث تتحلل الكتلة لتوليد الطاقة. في الأفران التي تعمل بوقود الحرق، يصبح الوقود من بين بنود الإنفاق الهامة ولذا فإن اقتصاديات استخدامه يعتبر من الأمور الأساسية. للتصميم الناجح للفرن، فإن المعلومات لكل البنود المحتملة للاستهلاك والفقد له أهمية كبيرة في حساب معدل استهلاك الوقود.

الكفاءة الحرارية للفرن وهي نسبة كمية الحرارة المستخدمة إلى الكمية الكلية للحرارة التي تم الإمداد بها، وهذه تتغير في مجالات كبيرة، منخفضة حتى ١٠%

إلى الأفران الميتاليرجية حتى ٦٠% أو حتى أكثر من ٩٠% في حالة الوحدة الحرارية ذات التصميم الحراري الجيد. الكفاءة الحرارية المنخفضة لبعض الأفران الميتاليرجية يرجع إلى كمية صغيرة من الحرارة المستهلكة حقيقة للاستخدامات المفيدة.

تقسيم اقتصاديات الوقود أو الكفاءة يمكن الحكم عليه بالميزان الحراري والذي يحتوي كل بنود المدخلات والمخرجات للعملية وميزانها. عند عمل الميزان الحراري، فإن كل البنود يجب كذلك التعبير عنها بنفس البنود لذلك فإن هذه تكون ذات مقارنة. الميزان الحراري يجب أن يبنى إما على فترة زمنية معينة، مثل دورة العمل كل ساعة أو كل يوم أو وحدة نوعية المنتجات الأولية/ النهائية.

في حالة الميزان الحراري لبنود المدخلات والمخرجات يتم أخذهم منفصلين كآلاتي:

المدخلات:

١. الكيماويات أو طاقة الوقود، الحرارة المدركة للوقود، هواء الحرق والشحنة، الطاقة الكهربائية أو الميكانيكية التي يتم توفيرها كأدوات إضافية مثل المراوح والطلببات.
٢. الحرارة المنبعثة بسبب التفاعل المنتج للحرارة (في حالة وجوده).

المخرجات:

١. المحتوى الكلي من الحرارة للمواد الخارجة (الحرارة الملموسة/ أو الحرارة الكامنة).
٢. الحرارة الممتصة في التفاعل الماص للحرارة (endothermic) أو في تغير المجال أو في ارتفاع درجة الحرارة ثم التغير في المجال.
٣. الحرارة الكلية للغازات الخارجة (الحرارة المدركة، والحرارة المختزنة في البخار الخارج، حرارة الوقود).
٤. الفقد في الحرارة خلال الحوائط والأسقف، الشقوق والفواصل بالتوصيل والإشعاع.

٥. فقد ثانوي وخاص، مرتبط بالعملية.

الميزان الحراري الكلي المتضمن إجمالي الطاقة الداخلة والخارجة بسيط نسبيا ويعطي فكرة حول الكفاءة الكلية فقط، ولكن ليس المساهمة المؤثرة للأقسام المختلفة مثل طبقة الوقود، غرفة الحرق، المسترجعات للاستفادة من حرارة الفرن المنصرفة (recuperator).....الخ. للحصول على الكفاءة الحقيقية لكل جزء على حدة فإنه يلزم عمل ميزان حراري تفصيلي لكل بند والذي يمكن أن يكون عملا صعبا ومجهدا ولكن في حالة عدم عمل الميزان المستقل لكل جزء فإن تصميم هذه الوحدات سوف لا يكون ممكنا. في حالة المدخلات يتم حساب الطاقة الكيميائية من حاصل ضرب كمية الوقود وقيمتها الحرارية، الحرارة المدركة من ناتج كتلة المادة، الفرق في درجات بين الأساس والحرارات النوعية. التأثيرات الحرارية، سواء كانت منتجة للحرارة أو ماصة للحرارة التي يمكن أن تحدث في العملية يمكن جمعها من المراجع وحسابها على أساس مقبول. كل هذه يمكن جدولتها كمدخلات ومخرجات وعمل الميزان.

توزيع الحرارة في الفرن:

في تشغيل الفرن، يجب وجود معرفة واضحة عن توزيع الحرارة التي يتم إمدادها للفرن. حرارة الحرق المنبعثة في مقطع الحرق يتم انتقالها بكل الطرق الثلاث لانتقال الحرارة (أي التوصيل والإشعاع والانعكاس) إلى الشحنة. هذا ما يعرف بالتحميل الحراري الحقيقي للفرن. بجانب ذلك، يتم انتقال الحرارة إلى الخارج خلال الحوائط والسقف، خلال الأرضية إلى الأرض وخلال الشقوق والفتحات الأخرى في الفرن. الحرارة تمر كذلك إلى الخارج خلال الباب عند فتحه للكمية الكبيرة من الحرارة تذهب إلى خارج غرفة الفرن مع الغازات العادمة الساخنة، كحرارة كامنة وحرارة مدركة. كل هذه الكميات عند إضافتها معا تشمل كمية الحرارة الحقيقية اللازم توفيرها للفرن خلال حرق الوقود بما يمكن الفرن من العمل طبقا لطاقته التصميمية. عدا الحمل الحقيقي للحرارة فإن كل البنود الأخرى تكون الفقد للفرن، والذي يسمى

الحرارة المفقودة. في حالة الاستخدام المناسب أو الاستعادة للحرارة المفقودة، فإنه يمكن توفير كمية مكافئة من الوقود بما يحسن من الكفاءة الكلية للفرن. النظام الذي ينطبق عليه هذا يسمى نظام استعادة الحرارة المفقودة (waste heat recovery system).

مصادر الفقد الحراري من الفرن:

جزء فقط من مدخلات الحرارة للفرن هو الذي يستخدم بواسطة الشحنة أو العملية ومعظم الأجزاء يذهب بدون استخدام مع الغازات العادمة وكذلك يفقد خلال الحوائط والفتحات في الفرن.

الفقد الحراري في الفرن يمكن تقسيمه إلى ثلاثة أنواع:

- الفقد الحراري من حوائط الفرن.
- الفقد الحراري من الفتحات والشقوق.
- الفقد الحراري خلال الغازات العادمة.

الفقد الحراري من حوائط الفرن:

يتم فقد الحرارة إلى المجال المحيط بالإشعاع والانعكاس من السطح الخارجي لحوائط الفرن وبالتوصيل إلى الأرض. حوائط الفرن التي بنيت من الطوب الحراري العازل والمغلقة في غلاف من الصلب تقلل سريان الحرارة إلى الوسط المحيط. خفض الفقد في الحرارة، بتوفير العزل الجيد لا يعني بالضرورة توفير تكلفة، لأن التكاليف الثابتة للعزل قد تزيد عن تكاليف توفير الوقود. لذلك ، فإن كمية العزل يجب إقرارها بحرص عند اعتبار الاقتصاديات الكلية.

الفقد الحراري من الفتحات والشقوق:

قد يكون هناك فتحات مختلفة في الفرن، مثل ثقب المراقبة (peephole) ، أبواب التنقيش. أبواب الشحن والتفريغ، التي تسبب الفقد الكبير في الحرارة، حيث يلزم فتح هذه الأبواب في أقل فترة زمنية اللازمة فقط لشحن وتفريغ الشحنة. الفتحات الأخرى في الفرن يجب أن تظل مغلقة لمنع الفقد الحراري بتسرب الغازات الساخنة

من الفرن أو من خلال دخول الهواء البارد إلى الفرن. الشقوق في حوائط الفرن يتم صيانتها لتجنب تسرب الغازات.

الفقد في الحرارة خلال الغازات العادمة:

يمكن خفضها بوجود النسبة الصحيحة بين الوقود والهواء لتأكيد الحرق الكامل للوقود مع أدنى كمية ممكنة من الهواء. إذا كان الحرق غير تام، فإن الوقود الغير محترق سوف يمر إلى الخارج مع الغازات العادمة. على الجانب الآخر الكمية الكبيرة من الهواء سوف تحتاج حرارة لتسخينها إلى درجة حرارة الفرن وعندئذ سوف تمر نفسها إلى الخارج مع الغازات العادمة.

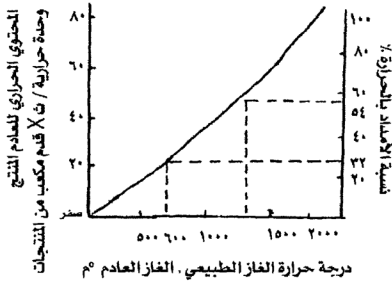
استعادة الحرارة المفقودة (Waste Heat Recovery)

على الرغم من استخدام الوقود بحكمة وعدم الفقد في الحرارة باستخدام هواء زائد قليل جداً أو كثير جداً، بتوفير العزل المناسب أو بتوفير خواص الانتقال الحراري الضعيف للمهمات، فإن الحرارة سوف يظل صرفها من المعدة بسبب درجة الحرارة التي تتم عندها العملية.

فمثلاً، عند تسخين فرن إلى 1200°C فإن الوقود الأولي يجب أن يوفر درجة حرارة أعلى من 1200°C ، درجة حرارة الغازات العادمة يجب أن تكون أعلى من 1200°C . في فرن الدفعات (batch) يتم صرف الغازات من الفرن عند درجة الحرارة هذه حتى في حالة أفضل النظم. الغازات التي تترك الفرن عند درجة الحرارة هذه تحتوي على نسبة كبيرة من الطاقة التي تم إمداد الفرن بها في شكل وقود. وهذه هي الحرارة التي تفقد. الحرارة المفقودة يمكن تعريفها بأنها الحرارة في نواتج الحرق التي تصرف عند أداء مهمتها الأولى. بالنسبة لأي كفاءة فإن الاعتبار الأساسي هو أن الحرارة المفقودة ليست زائدة أو مفقودة على حساب عدم كفاءة الأداء الأولي ولكنها قابلة للاستخدام في الأغراض الأولية (التسخين الأولي). المحتوى الحراري لنواتج الحرق يرتفع بارتفاع درجة الحرارة ولذلك، فكلما كانت الغازات العادمة أكثر سخونة،

كلما زادت كمية الحرارة التي يمكن استعادتها.

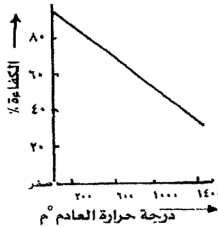
الشكل (٢/٤) يوضح اختلاف المحتوى الحراري لنواتج الحرق المكافئة للغاز الطبيعي مع درجة الحرارة. محور محتوى الحرارة على المخطط يوضح الوحدات الحرارية في الثانية/ القدم المكعب (Btu/ sft³) لنواتج الحرق وكنسبة للحرارة الكلية المتاحة من الوقود.



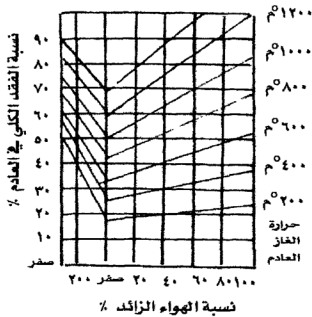
شكل (٢/٤)

من هذا يمكن أن نرى أنه في حالة صرف الغازات عند ١٣٠٠ م°، فإن ٧٠% من الوقود يذهب إلى العادم في المنتجات العادمة، حتى عند درجات الحرارة المنخفضة يتم فقد كميات كبيرة من الطاقة بهذه الطريقة.

الشكل (٢/٥) يوضح أقصى كفاءة ممكنة للعملية خلال مجال درجات حرارة خروج الغازات العادمة. وهذا عكس شكل (٢/٤).



شكل (٢/٥) يوضح كفاءة الانتقال الحراري
من نواتج الاحتراق مقابل درجة حرارة الغاز
الخارج العادم



شكل (٢/٦) نسبة الفقد الكلي في العادم
الغاز الطبيعي

كمية الحرارة المتاحة في هذه الغازات العادمة لذلك تكون كبيرة ومن المهم ملاحظة أن الكميات النسبية للحرارة المفقودة بحرق الهواء الزائد وفي الحرارة المفقودة. شكل (٢/٦) يوضح الاختلاف في كمية الحرارة في نواتج الحرق الناتجة بحجم ثابت من الغاز عند مجال معاملات انواء الزائد. من هذا المخطط نرى أن الفقد في العادم يزداد بزيادة مستوى الهواء الزائد. ولكن عند صفر هواء زائد فإن كمية الفقد الحراري عند درجات الحرارة العالية تكون كبيرة.

استخدام الحرارة المفقودة كمصدر حراري ثانوي:

في كل عمليات التسخين في الصناعة، يتم فقد حرارة ثمينة في المنتجات. هذا يمكن اعتباره كمصدر ثانوي للطاقة رئيسي، أن يحقق مساهمة اقتصادية حقيقية في كل العملية الحرارية في حالة استخدامها. إعادة استخدامها.

في بعض الحالات يمكن استخدام الغازات العادمة مباشرة في عملية مجاورة أو للتسخين المسبق أو لتجفيف الهواء المضطرب تصنيعها. ولكن في معظم الحالات، فلين الحرارة المفقودة يكون استخدامها مباشر و مباشرة في العملية التي تم إنتاج هذه الحرارة منها ذلك باستخدامها في تسخين الهواء اللازم للحرق. نظام التدوير هذا له مميزات كبيرة من بينها أنه لا يوجد فقد حراري الذي لا يمكن استخدامه.

الذي يمكن استعادته هو فقط الحرارة المدركة (الملموسة) في الغاز العادم إلى حد ما. الاستعادة الكاملة للحرارة المفقودة غير ممكن نظريا أو اقتصاديا ولذلك فإنه ينصح باستعادة أقصى كمية من الحرارة.

التقنيات الرئيسية لاستعادة الحرارة المفقودة هي:

- الاستعادة كبخار خلال غلايات الفقد الحراري.
- كحرارة ملموسة خلال المولدات و جهاز استعادة استخدام الطاقة (recuperators).
- التسخين المسبق للشحنة الساخنة بما يقارب المنطقة الساخنة.
- التسخين العالي للبخار، التسخين المسبق لمياه تغذية الغلايات وهواء الحرق

في الغلايات.

غلايات الحرارة العادمة: (Waste Heat Boilers)

تلك الغلايات تعمل بالحرارة الفاقدة في الغازات العادمة. وهي مفيدة في حالة درجة حرارة الغاز العادم أقل من ٦٥٠ - ٧٥٠ م°. التوزيع الأولي بين الوقود وغلايات البخار التي تعمل باللهب وغلايات الحرارة العادمة هي أن انتقال الحرارة في الأولى أكبر بسبب الإشعاع بينما في الثانية هي أساسا بالانعكاس والتوصيل كما في حالة دخول الغازات العادمة معظمها من نوع غلايات ماسورة اللهب (fire tube)، حيث الحرارة الملموسة للغازات تستخدم فقط لتحويل الماء إلى بخار. البخار الذي يتم إنتاجه يستخدم كمجال تسخين أو في التفاعلات، كما في حالة غاز الماء أو إنتاج الغاز المعدل (reformed). حيث أنه يعمل على منتجات الحرق، فإن مخاطر انفجاره تكون قليلة.

كميات الغازات التي يتم تدولها بغلايات الحرارة العادمة كبيرة نسبيا مقارنة بتلك ذات حرق الوقود لذلك فإن الخفض في الضغط بسبب التدفق يكون أعلى. غلايات الحرارة العادمة تصبح ضخمة بسبب الأسطح ذات التبادل الحراري العالي التي تتوفر لكل من معامل الانتقال الحراري وفرق درجة الحرارة بين البخار المنتج والغازات العادمة لكونهم بقيم منخفضة.

يتم توفير السحب الكافي للتغلب على تلك المقاومات. في حالة أفران حرق الفحم أو الوقود الغاز الغير نظيف، يكون من الضروري تنظيف الأنابيب لمنع ترسب جسيمات الأتربة والغبار في الأنابيب والتي تزيد من مقاومة تدفق الغازات والحرارة. الأنابيب يمكن تنظيفها بفرش من السلك، بما يمكن من مراجعة الترسبات المستديمة. في حالة الغلايات ذات الماء في الماسورة يتم استخدام طرق كسح السناج لهذا الغرض.

كمية الحرارة التي سيتم استعادتها في غلايات الحرارة العادمة تتوقف على

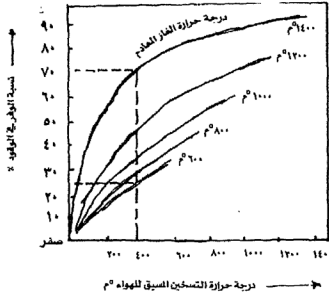
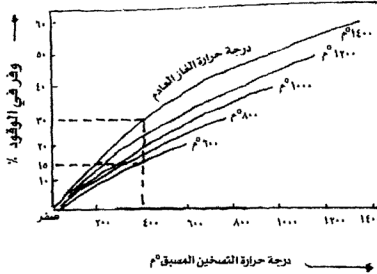
درجة حرارة الغازات. يتم تصميم الغلاية على أساس الكمية الكلية للحرارة المحسوسة في الغازات التي تتناسب مباشرة مع كمية درجات حرارة الدخول والخروج ويتم نقل كمية أقل من الحرارة إذا كانت درجة حرارة المدخل انخفضت وبذا يصبح ضغط البخار أقل مع إتلاف كمية البخار.

يمكن خفض درجة حرارة الغاز الداخل بإدخال الهواء البارد في الغلاية. فهو لا يخفض فقط معدل إنتاج البخار ولكن يزيد كذلك حجم الغازات التي يتم تداولها بواسطة المروحة وتزداد متطلبات الطاقة. يتم أخذ الاحتياطات المناسبة لإبعاد دخول الهواء إلى خط الغاز.

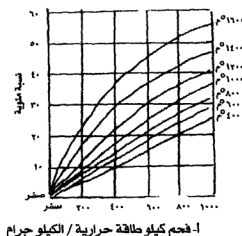
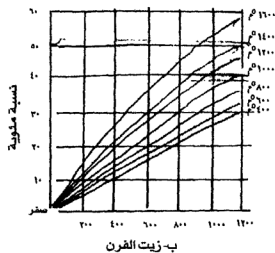
المسترجعات: (Recuperators)

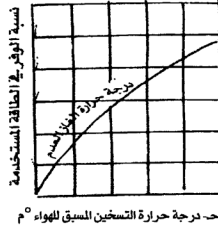
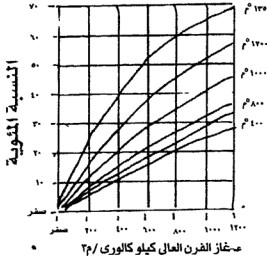
انتقال الحرارة من مجرى سائل ساخن إلى مجرى بارد يتم في المبادلات الحرارية، حيث لا يتم الاختلاط بين كل من تدفقات كل السائلين، حيث يكون منفصلين بواسطة فاصل مقوي. الأكثر شيوعا هي المبادلات الحرارية ذات الأنبوبية والغلاف (shell and tube)، حيث يتحرك سائل خلال الأنبوب والآخر خلال الغلاف. وهما في عمل مستمر. المسترجعات هي مبادلات حرارية مصنوعة إما من أنابيب معدنية أو من قنوات من مادة حرارية. نظرا لحدود درجات حرارة التشغيل للمعادن، فإن المواسير/ القنوات الحرارية تنشأ للعمل عند درجات الحرارة المرتفعة. وهذه تصبح ضخمة وأحيانا مسببة للتسرب (leaky) بسبب صعوبة الإنشاء ولكن تعمل كمستودع حراري حيث التغيرات في درجة الحرارة بين الموائل الساخنة والباردة يكون متدني. يمكن اعتبار المسترجع أنه مبادل حراري الذي ينقل الحرارة عبر الفرن من جانب حيث تدفق الغازات العادمة وعند الجانب الآخر حيث هواء الحرق وندارا وقود الغاز. الفرق الأساسي بين هذا والمجدد أو المسترجع (regenerator - الذي يعيد بعض الحرارة المنصرفة إلى الغاز [أو الماء] الداخل). في العمل، هو أن المسترجع (recuperator) هو نظام العمل باستمرار ولكن المجدد (regenerator) يعمل بطريقة متقطعة حلقة. في حالات معينة نتائج الاسترجاع يمكن استنتاجها. الاسترجاع يستخدم

عموما في الأفران الضخمة بسبب ارتفاع التكاليف الرأسمالية. الوفير في الوقود (الغاز الطبيعي) الذي يمكن الحصول عليه باستخدام المسترجع للتسخين المسبق للهواء يمكن تعيينه من الشكل (٢/٧)، (٢/٨).



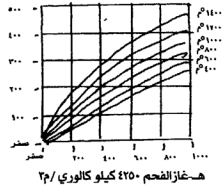
من هذه العلاقة يتضح أن التسخين المسبق للهواء يمثل نسبة أكبر من توفير الحرارة الكلية الداخلة كلما كانت درجة حرارة الغاز العادم أعلى. هذا المعامل هام عند تقييم قيمة المسترجع لمختلف العمليات. فمثلا الشكل (٢/٧) التسخين المسبق عند 400°C يعطي وفر في الطاقة قدره ١٥% عندما تكون درجة حرارة الغاز العادم 600°C ، وحوالي ٣٠% عندما تكون درجة حرارة الغاز العادم 1400°C . هذا لأن الفقد في الغاز العادم عند 1400°C هو ٥٤% من الحرارة الكلية الداخلة، بينما عند 600°C يكون الفقد ٣٢%. شكل (٢/٤). استخدام الهواء الزائد للحرق يزيد جهد الوفر في الوقود كما هو موضح في الشكل (٢/٨). إمكانية اقتصاديات الوقود بالتسخين المسبق للهواء باستعادة الحرارة المفقودة بنوع الوقود موضح في الشكل (٩/٢).



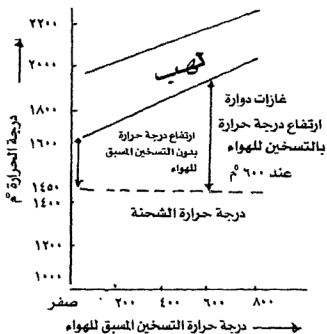


ملاحظة : بالنسبة لوقود غاز الفحم درجة حرارة التسخين المسبق للهواء ٤٠٠ م° تحقق وفرة الوقود أكثر من ٢٠ % عندما تترك الغازات العادمة الفرن عند ١٠٠٠ م°

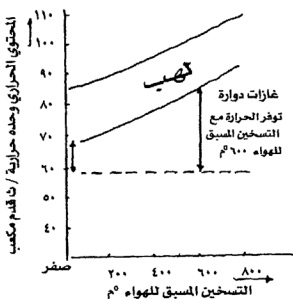
شكل (٢/٩) طاقة الوفر في الوقود باستعادة الحرارة المفقودة ،
مختلف أنواع الوقود (أ، ب، ج، د، هـ)



نتيجة التسخين المسبق للهواء في درجات حرارة لهب المسترجع تزداد ويمكن الحصول على معدلات انتقال حراري أعلى . تأثير التسخين المسبق للهواء على درجة حرارة اللهب ودرجة حرارة غاز الفرن موضح في الشكل (٢/١٠) ، الشكل (٢/١١). على التوالي لعملية تعمل عند ١٤٥٠ م°. الفرق في درجات الحرارة بين الغازات التي يتم تدويرها والشحنة يتضاعف بالتسخين المسبق للهواء الحرق عند ٦٠٠ م°. هذه الزيادة في معدل الانتقال الحراري تؤدي إلى قصر دورات التشغيل وتحسين الكفاءة وخفض تكاليف الوقود.



شكل (٢/١٠) اختلاف درجة حرارة اللهب مع التسخين المسبق للهواء



شكل (٢/١١) اختلاف المحتوى الحراري لتواتج الحرق عند درجة حرارة اللهب مع التسخين المسبق للهواء

المسترجعات المعدنية أكثر كفاءة بسبب المقاومة المنخفضة لسريان الحرارة والإنشاء المدمج القوي. ولكن المسترجعات المعدنية لا يمكن استخدامها عند درجة حرارة أعلى من 700°C ، نظرا لأن التآكل يسود عند درجات الحرارة العالية. الأنواع المختلفة من المسترجعات موضحة في الشكل (٢/٢٤) وهي:

- ذات التدفق الموازي.
- ذات التدفق المعاكس.
- ذات التدفق المتقاطع.

في التدفق الموازي يكون كلا من السوائل الساخنة والباردة في نفس الاتجاه حيث تنتقل الحرارة أثناء التدفق. في التدفق المعاكس تتحرك السوائل في اتجاهات معاكسة، بينما في التدفق المتقاطع فإن السوائل تتحرك בזواوية قائمة بالنسبة لكل منهما. تتخفض درجة حرارة السائل الساخن، وترتفع درجة حرارة السائل البارد. توزيع درجة الحرارة على طول المسترجع للتدفق الموازي والتدفق المعاكس والتقاطع موضح في الشكل (٢/٢٤). درجة الحرارة في الأنابيب وحولها تختلف من القمة إلى القاع.

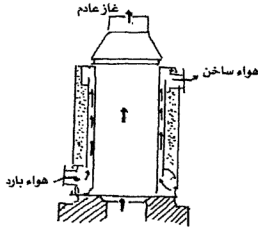
مسترجعات التدفق المعاكس هي الأكثر كفاءة. يمكن تسخين الهواء أو غاز الوقود قريبا جدا من درجة حرارة الغازات العادمة الساخنة والفرق في درجة الحرارة بين السوائل الساخنة والباردة يكون ثابت غالبا خلال طول الممر. في حالة التدفق الموازي أقصى تسخين مسبق يمكن الحصول عليه فقط نظريا حتى متوسط درجة حرارة لكل من السائلين القادمين، والذي لا يتم تحقيقه عمليا. التدفق المعاكس عادة لا يتم استخدامه.

طبقا لشكل الانتقال الحراري فإن المسترجعات المعدنية تكون من ثلاث أنواع وهي الإشعاع، الانعكاس والنوع الذي يجمع بين الإشعاع والانعكاس.

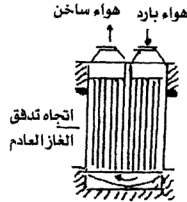
مسترجعات الإشعاع: (Radiation Recuperator)

في مسترجعات الإشعاع تدخل نواتج الحريق إلى المسترجع خلال فتحة في سقف الفرن حيث يتدفق الهواء عند سرعة أعلى خلال حلقة ضيقة بين الحوائط

الداخلية والخارجية. الغلاف الخارجي يكون معزولاً. يتم توفير ريش أو زعانف (fins) على الجدار الداخلي لزيادة مساحة الانتقال الحراري. هذا النوع من المسترجع البسيط مناسب لتحديد الأفران الصغيرة للطرق (forging). وهذا موضح في الشكل (٢/١٢). كما يوجد مسترجع الإشعاع الجانبي الموضح في الشكل (٢/١٣).



شكل (٢/١٢) مسترجع الاشعاع المعدني

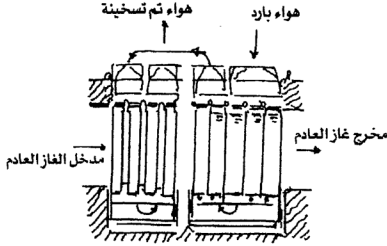


شكل (٢/١٣) مسترجع الأشعاع للعادم

مسترجعات الإشعاع يمكن أن تعمل بدرجات حرارة الغاز العادم في المجال من ١٠٠٠ - ١٥٠٠ °م للتسخين المسبق للهواء حتى ٦٠٠ °م. مميزات مسترجع الإشعاع نسبة إلى مسترجع الانعكاس هو أن الانتقال الحراري يكون كثيفاً خلال الإشعاع كما يوفر كذلك احتمال تسخين مسبق أعلى للهواء. مميزات أخرى هي الخفض في فقد الضغط في جانب الغاز العادم بسبب كبر المقاطع، وبذا يزيد احتمال استخدام الغازات العادمة المحملة بالغبار.

مسترجعات الانعكاس: (Convection Recuperator)

هذه الأنواع من المسترجعات إما أن تكون بنظام التسخين المصنع من مواسير الصلب المسحوبة أو مواسير الحديد الزهر. مسترجعات الانعكاس تستخدم مع درجات حرارة الغاز العادم من ٣٠٠ - ١٠٥٠ °م. درجة التسخين المسبق للهواء محدودة عند ٦٠٠ °م. مسترجع الانعكاس الأنبوبي موضح في الشكل (٢/١٤).



شكل (٢/١٤) مسترجع أنبوبي بالانعكاس

مسترجع الجمع بين الإشعاع والانعكاس

Combined Radiation and Convection Recuperator

مميزات مسترجعات الإشعاع والانعكاس تكون مجمعة في نظم أسطح الانتقال الحراري. في هذا النظام، يتم تنظيم حزمة من الأنابيب في حلقة داخل مسترجع من نوع الغلاف المزدوج. كل ارتفاع ٢١ م في درجة حرارة هواء الحرق يحقق وفر في وقود سائل بقيمة ١%. يزداد الوفر مع زيادة درجة حرارة اللهب، خفض مستوى الهواء الزائد، وزيادة إنتاجية الفرن.

تلف المسترجعات المعدنية:

أجزاء المسترجعات التي تصل إلى درجة حرارة ٥٠٠ م° وأعلى تكون معرضة للأكسدة بالأكسجين، بخار الماء أو ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغازات العادمة. درجة العدوانية تعتمد على درجة حرارة الفرن بالإضافة إلى تركيز المؤكسيدات في الغازات. ولكن، السبائك يمكن أن تقاوم الأكسدة حتى درجة حرارة ١١٠٠ م° ولكن سيكون المسترجع معرض للترسبات (scaling) ويحتاج إلى الاستبدال. العناصر السبائكية في الصلب مثل الكروم، النيكل، السيليكون تستخدم

لتحمل العمل في درجات الحرارة العالية.

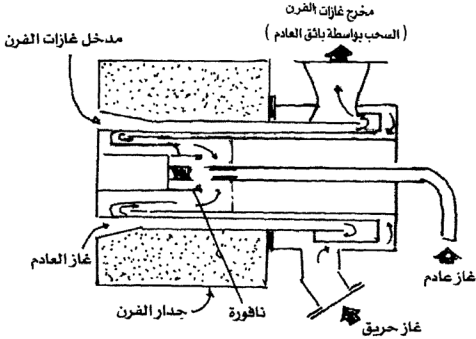
عدوانية الكبريت في الغازات العادمة تتوقف على طبيعة الغازات (مؤكسدة أو مختزلة)، درجة حرارة الغازات، درجة حرارة الحائط ونوع المعدن المستخدم كأسطح تبادل حراري، ووجود أكاسيد الفاناديوم والكبريت في الغازات العادمة يكون عدوانيا. عند النهاية البادرة للمسترجع قد يحدث تآكل حامضي بسبب عدوانية الكبريت، إذا انخفضت درجة حرارة المعدن إلى أقل من نقطة الندى للغازات. نقطة الندى للحامض لمنسجات الحريق تعتمد أساسا على المحتوى من الكبريت في الوقود وتتغير ما بين ١٣٠م بـ ١% كبريت إلى حوالي ١٨٠م بـ ٤% كبريت في الوقود. مشكلة تآكل درجة الحرارة المنخفضة يتم الحذر منها عند تصميم المسترجع، بتأكيد أن درجة حرارة الحائط في كل أجزاء المسترجع هي فوق نقطة الندى للحامض للغازات باختیار الإطوار المناسب لتدفق الغاز/ الهواء وأي تغيرات أخرى في الشكل الإنشائي للمسترجع.

تآكل درجة الحرارة العالية للمسترجعات هو التآكل الذي يحدث على الأسطح المعدنية في مجال معين من درجة الحرارة بسبب القليل جدا من ملوثات الفاناديوم (traces) في رماد الوقود. الأكاسيد المعدنية الغير مذابة في رماد الوقود مثل خامس أكسيد الفاناديوم وأكسيد الصوديوم تحدث تآكل حاد عندما تكون درجة حرارة المعدن حوالي ٦٨٠°م. أخطار تآكل درجة الحرارة العالية يمكن تجنبها بالمحافظة على درجة حرارة جدار المعدن للمسترجع أقل من ٦٨٠°م. وهذه الحدود ليست موجودة في حالة المسترجع من السيراميك. التشقق والتسرب في أجزاء التبادل الحراري للمسترجع يرجع إلى التمدد الحراري لا يتم بانتظام في الأجزاء المختلفة من المسترجع. أحيانا، يحدث هذا كذلك في المسترجعات التي يفترض أن تتمدد في اتجاه معين حيث تعاق بسبب أو حيود أو تغير في الغلاف الحراري للمسترجع. هذه المشكلة يمكن مقاومتها بالانتباه نحو التمدد الحراري في المسترجعات المعدنية في مرحلة التصميم.

مقارنة بين المسترجعات المعدنية والمسترجعات من السيراميك:

- المسترجعات المعدنية أخف من المسترجعات من السيراميك المكافئة بعشرة أو عشرين ضعف.
- المسترجعات المعدنية تشغل ١٥ إلى ٣٠ ضعف مساحة أصغر ولذلك فإنها تحتاج إلى أعمال مدنية أقل.
- المسترجعات المعدنية هي عمليا مقاومة للتسرب ولذلك فإنه يمكنها تداول غازات الوقود السامة بينما المسترجعات من السيراميك تسبب التسرب إلى حوالي ٥٠% من حجم الغازات والهواء الذي يتم تداوله.
- المسترجعات المعدنية تعتبر اقتصادية عند استخدامها للتسخين المسبق للهواء عند درجة حرارة أقل من ٦٥٠ °م. بينما المسترجعات السيراميك تكون اقتصادية فقط عند التسخين المسبق للهواء لدرجة حرارة أعلى من ٦٥٠ °م.
- المسترجعات المعدنية ذات التصميم الخاص يمكن أن تقوم بالتسخين المسبق للهواء حتى ٦٥٠ °م.
- المسترجعات المعدنية يمكن أن يكون لها فروق أعلى في الضغط بين الغاز العادم وجانب الهواء (١٠٠٠ ملليمتر مقارنة بـ ٥٠ - ٧٠ ملليمتر للمسترجعات السيراميك).
- المسترجعات المعدنية يسهل صيانتها وإنشائها كما أن تكلفتها الأولية أقل.

موقد الاسترجاع: (Recuperative Burner)

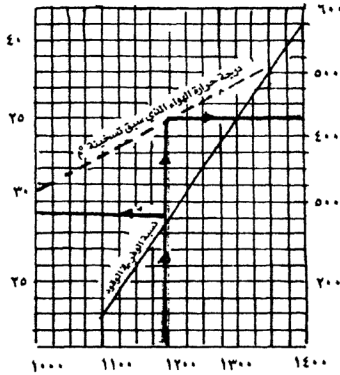


شكل (٢/١٥) موقد المسترجع

موقد الاستخدام هو تطوير حديث في تكنولوجيا المسترجع لحرق الغاز حيث يزود المسترجع بنظام موقد بحيث أن الغازات العادمة يتم سحبها إلى الخلف خلال وحدة مجمعة. مهمة الموقد في وحدة مدمجة واحدة الذي يوفر وسائل اقتصادية لاستعادة الحرارة المفقودة في وحدة العمل بالمرحلة الواحدة (batch) ذات درجة الحرارة المرتفعة. هنا يتم إمداد الموقد بالغاز العادم والهواء. الغازات العادمة بدلاً من التخلص منها خلال المسار التقليدي يتم سحبها إلى الخلف خلال الموقد وتستخدم في التسخين المسبق لهواء الحرق إلى 600°C كحد أقصى طبقاً لنوع الموقد ودرجة حرارة العملية. موقد الاسترجاع موضح في الشكل (٢/١٥).

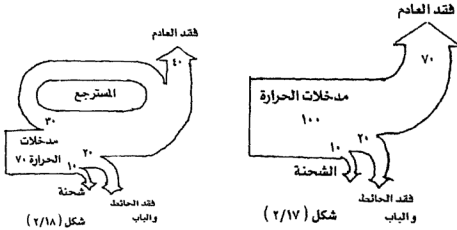
تستخدم موقد الاسترجاع في تسخين المغرفة من الصلب/ المعدن المستخدمة لنقل المعدن، وكذلك لحرق مشغولات السيراميك، تسخين كميات وقطع الصلب في أفران التسخين المسبق.... الخ. إنشاء موقد الاسترجاع يمكن أن يقلل استهلاك الوقود

في عمليات التسخين/ الأفران باستمرار. ترشيد الطاقة باستخدام موقد الاسترجاع يتوقف على درجة حرارة الغازات العادمة ودرجة الحرارة المطلوبة في الحرق. شكل (٢/١٦) يوضح العلاقة بين كمية التسخين المسبق الذي يعطي لهواء الحرق بالتبادل الحراري مع عادم غازات الفرن ونسبة الوقود التي يمكن توفيرها باستخدام هذا النوع من الموقد



درجة حرارة الغاز العادم °C
شكل (٢/١٦) وفرالوقود باستخدام مواقد الاسترجاع

الشكل (٢/١٧)، الشكل (٢/١٨) يوضح مخطط الهبوط على التوالي لفرن التسخين المسبق ذو الدفعة الواحدة بدون مسترجع وبالمسترجع الذي يشرح أن إنشاء المسترجع قلل الفقد في العادم من ٧٠% إلى ٤٠% وبذلك مدخلات حرارة الوقود من مستوى ١٠٠ إلى ٧٠.



الشكل (٢/١٧) و (٢/١٨) يوضح مخطط الهبوط علي التوالي لفرن التسخين المسبق ذو الدفعة الواحد بدون مسترجع وبالمسترجع

المجددات، المسترجعات: (Regenerators)

المجددات هي مبادلات حرارية مصنعة من الطوب الحراري وتعمل في زوجين (pairs). يتم تنظيم الطوب ليتدفق الغاز خلاله مع فقد قليل في الضغط. تعمل الغرف في دورات تسخين وتبريد. تسخين الغرف يتأثر بالغازات العادمة الساخنة التي تستدفق إلى أسفل حيث تترك غرفة الفرن بعد نقل الحرارة إلى الشحنة في تشغيل الفرن. يتم عندئذ التبريد بمرور هواء و/ أو غازات الوقود خلالها في الاتجاه العلوي في الدورة التالية. في الشكل (٢/٢٤)، خلال الغرف التي على اليسار يتدفق الهواء وغاز الوقود منفصلين ويتم تسخينهم خلال انتقال الحرارة من بناء الطوب. وهم في دورة التسخين. الغرف التي على الجانب الأيمن (التي يمر خلالها الغازات العادمة الساخنة) يتم تسخينها من القمة إلى القاع. وهم في دورة التسخين. درجة الحرارة عند قمة طبقة الطوب أعلى من النهاية السفلى. بعد فترة زمنية محددة حوالي ٢٠ - ٣٠ دقيقة، ينعكس شكل التدفق بمحس عاكس ويتم تدفق الهواء والغاز خلف الغرف على الجانب الأيمن ويتم حرق غاز الوقود وتصبح درجة حرارة اللهب أعلى مع توفير

كبير في الوقود. يجمع تصميم المجددات عموماً بين القوة الميكانيكية لمقاومة الصدمات الحرارية، أدنى مقاومة لتدفق الغازات، وأكبر زمن للاتصاق، وعدم حدوث اختناق بسبب الغبار أو الأدخنة في نواتج الحرق وأقصى انتقال حراري للأسطح المتاحة. لتجنب الإجهاد الحراري في المواد الحرارية بسبب الخفض في درجة الحرارة بين دورات التسخين والتبريد، الانعكاسات (reversals) تكون ضرورية ويتوقف زمن الانعكاس على الانخفاض في درجة الحرارة المسموح به لأدنى إجهاد. للجمع بين زيادة سطح امتصاص الحرارة مع الاستخدام الاقتصادي لبناء الطوب، يتم أحياناً استخدام أشكال خاصة. السمك عادة يكون محدود بحوالي ٥٠ ملليمتر. يتم استعادة حوالي ٦٠ - ٨٥% من الحرارة المحسوسة من الغازات العادمة أثناء المرور خلال المجدد كتسخين مسبق للهواء و/ أو الوقود الغاز. عند أخذ الحرارة المعادة إلى الفرن بالتجديد (regeneration) خلال الوقود الغاز والهواء كنسبة مئوية من الحرارة الملموسة في الغازات الخارجة، التي تكون الكفاءة الحرارية الحقيقية لنظم التجديد، فإن أقصى قيمة يمكن تحقيقها هي حوالي ٤٠% طبقاً لدرجة التسخين المسبق التي يسمح بها. المجددات تستخدم عند درجات الحرارة الأعلى عن تلك للمسترجعات والتسخين المسبق لما بعد ١٠٠٠°م.

مصطلح التجديد يطبق في النظم المستخدمة في الحرق الدوري (cyclic). يستخدم بالتبادل اثنين من القنوات (ducts) مجاري لهواء الحرق ومجاري للغاز العادم، يتم بناء جسر من حوائط الحرارية ذات الفتحات (open work) في كل قناة (أو مجرى) وهذا هو المجدد. دورة الحرق تكون بحيث بينما يكون أحد القنوات حاملاً هواء الحرق إلى الموقد، القناة أو المجرى الثاني يحمل الغازات العادمة بعيداً، المولد في مجرى العادم يتم تسخينه حتى درجة حرارة الغاز العادم. عند الوصول إلى هذا، يتم انعكاس الحرق أي يصبح مجرى العادم هو مجرى هواء الحرق والعكس صحيح. هواء الحرق البارد يمر خلال المجدد ويتم تسخينه المسبق قبل الوصول إلى الموقد. التكاليف الرأسمالية تكون مرتفعة والمجدد يكون ضخماً وهذا يحد من استخدام المجدد

للأفران الضخمة التي تعمل عند درجات الحرارة المرتفعة مثل أحواض الزجاج، أفران المجرمة المكشوفة... الخ. في هذه العمليات، تكاليف الوقود تكون جزء كبير من تكاليف المنتج ومجموع هذا مع درجة الحرارة المرتفعة للغاز العادم تجعل أن استخدام المجددات أساسي والذي يمكن أن يضاعف الكفاءة للعملية من حوالي ١٥% إلى ٣٠%. في التجديد أو الاسترجاع (regeneration) توجد علاقة بين حجم الفرن (المجدد)، الوقت بعد الانعكاسات، سمك الطوب الحراري، والتوصيل الحراري للطوب ونسب التخزين الحراري للطوب. زيادة لفترة الزمنية بين الانعكاسات (reversals)

يعني تخزين حراري أعلى وبالتالي تجديد أكبر وتكاليف أعلى. بالإضافة إلى أن زيادة الفترة الزمنية للانعكاسات ينتج عنها انخفاض متوسط درجة الحرارة للتسخين المسبق وبالتالي خفض اقتصاديات الوقود. تراكم الغبار على الطوب والخبث على سطح الطوب يقلل من كفاءة الانتقال الحراري في المجدد حيث يصبح الفرن عجوزا أو همرما. الفقد الحراري من حوائط المجددات وتسرب الهواء إلى الداخل أثناء دورة (فترة) الغاز والتسرب إلى الخارج أثناء دورة (فترة) الهواء يسبب انخفاض واضح في معامل الانتقال الحراري. مع أخذ كل هذه العوامل في الاعتبار، فإن المعامل الكلي للانتقال الحراري (للمربعات - checkers) التي تعمل بالغاز الطبيعي يمكن أن يؤخذ ما بين ٤ - ٦,٥ كيلو سعر حراري/م^٢/الساعة/م^٥.

مواقف (cowper) هي من أنواع المجددات الخاصة المستخدمة في صناعة الصلب للتسخين المسبق للهواء للفرن العالي. في هذه المواقف بدلا من الحرارة الملموسة، فإنه تستخدم الحرارة الكامنة في غاز الفرن العالي بحرق الغاز في بناء ترابيعي (chequered work) في الهواء ثم التسخين المسبق للتيار الهوائي (blast) عند مروره خلال الطوب الساخن في الدورة التالية. عندئذ ترتفع درجة حرارة الهواء أكثر من ١٠٠٠ م^٥ ويدفع خلال مواسير النفخ (tuyers) إلى الفرن العالي. المجددات تستخدم في أفران الكوك، وأفران المجرمة المكشوفة (open hearth)، وأفران التسخين للدفعات (batch heating).

المجددات الدوارة (العجلات الحرارية):

Rotary Regenerators (Heat Wheels)

دورة الحرق الضرورية لاستخدام المجددات ذات الطبقة الثابتة تم التخلص منها من خلال المجددات الدوارة المطورة. القيمة الأصلية لمثل هذه العجلات الحرارية (المجددات الدوارة) تم تنفيذه بواسطة (Jungstron) في القرن قبل الماضي.

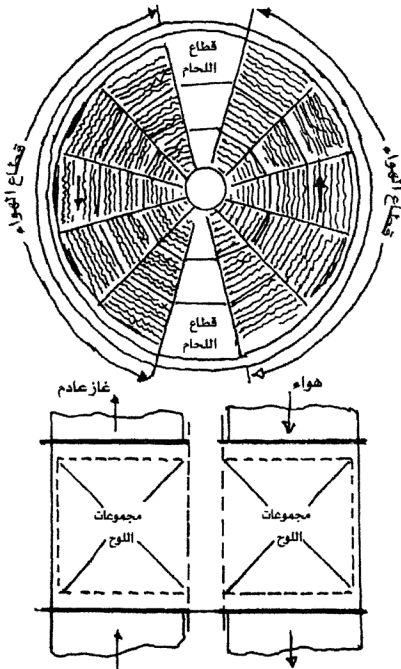
تخزين وانطلاق الطاقة الحرارية هو الظاهرة الوحيدة للمجددات ذات الطبقة الثابتة التربيعية والمبادلات الحرارية الصناعية المجددة. في المجددات الشبكية الدوارة (لنجسترون)، الدوار الأسطواني المحتوي على أسطح انتقال حراري دوارة (عند ١ - ٣ لفة في الدقيقة) داخل غلاف (housing) المقسم إلى قسمين. يتم امتصاص الحرارة العادمة من الغاز العادم ونقلها إلى الهواء البارد القادم بواسطة السطح (العجلة) الدوار باستمرار للانتقال الحراري المكون من ألواح معدنية (ويسمى الشبكة أو العناصر).

المصفوفة (matrix) تكون في اسطوانة تدور عبر الغاز العادم وتدفقات الهواء. عند مرور أسطح التبادل الحراري خلال التدفق المعاكس الطبيعي للغاز العادم وتدفقات الهواء الداخل، فإن الحرارة يتم امتصاصها بانتظام وتتطلق إلى هواء الحرق بما يحافظ على استمرار دورة التجديد. دوار العجلة الحرارية، الذي يتكون من مقاطع إما من شبك الصلب أو من مواد الشعيرات الغير عضوية ذات غطاء ماص للرطوبة من سيراميك الزجاج، الذي يوفر مساحة سطحية كبيرة إلى تدفقات الهواء أو الغاز. هذه الطريقة المباشرة للانتقال الحراري ينتج عنها درجات حرارة أعلى للمعدن مقارنة بالمسترجعات. انخفاض درجات حرارة الغازات الخارجة والتسخين المسبق الأعلى للهواء مع أدنى تآكل ممكن تحقيقه. طبيعي، يكون كلا من تدفقات الغاز العادم والهواء متشابهين في الكم وسرعة الدوران يمكن أن تكون (حتى ١٠ - ٢٠ لفة في الدقيقة) متغيرة لتوفير أفضل كفاءة. الانجذاب الرئيسي للمجددات الدوارة هي أنه يمكن أن تستخدم للغازات العادمة ذات درجة الحرارة المنخفضة كما أنه يمكن أن تنقل الحرارة

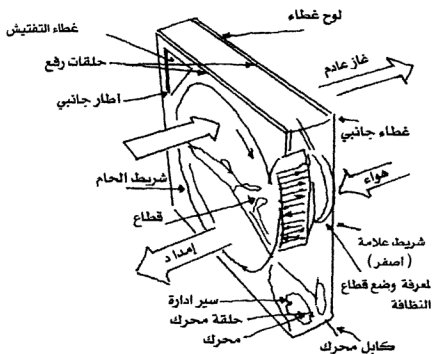
الكامنة بالتصميم المناسب للمنظومة (matrix). يتم توفير لحامات لخفض تسرب البخار المقاطع (أي دخول الغاز العادم في الهواء). كذلك لتجنب التلوث الذي يحدث بين التدفقيين للغاز، سهولة النضح بين تدفقات الغاز التنظيف والغاز الغير نظيف.

نظرا لأن تدفقات الغاز العادم وتدفقات الهواء القادم يجب أن يظلا منفصلين، لذلك فإن حجم المواسير (الرأسية أو الأفقية) وحجم العجلات (wheels) والمواسير (ducts) يتوقف على معدلات التدفق لكلا التدفقيين والذي يجب طبيعيا أن يكون متوازنا.

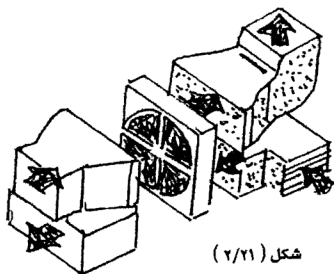
أسطح الانتقال الحراري تكون متغيرة وفي شكل طبقات خلال الدوار. كل طبقة يتم تصميمها لاحتواء مجموع الشواهد لأقصى استعادة للحرارة، عند أدنى تكلفة للطاقة مع القدرة على استمرار الأسطح التنظيفة وخفض التآكل. التطوير الحديث في المجددات الدوارة تشمل منظومة دوارة أعمق لزيادة استعادة الحرارة، والطرق الباردة لسطح الانتقال الحراري الذي يمكن دورانه لفترة ممتدة والسطح الجانبي الذي يتم إزالته. الكفاءة حتى ٨٠% يمكن تحقيقها لهذه التجهيزة ولكن يمكن أن تتغير كثيرا طبقا للحالات المنفصلة. تستخدم المرشحات لتنظيف الغاز العادم الحامل للغبار لاستمرار كفاءة العجلة الحرارية. استخدام الغطاء المرطب يوفر استعادة الحرارة الكامنة (مثل، استخدامات حمام السباحة) بهذا فإن الغطاء يمكن أن يقلل كثيرا الفقد في الحرارة الكامنة المصاحبة لتفريغ الهواء المشبع. التطبيقات الصناعية التقليدية للمجددات الدوارة تشمل استعادة الحرارة من أفران صهر المعادن والغلايات، موافد الفرن العالي، نظم التفتيش...الخ. على خط أو بعيدا عن خط سطح الانتقال الحراري تمكن النظافة بدفق وغسيل الماء، تدفقات الهواء بطاقة كبيرة، ونافخات السناج بالبخار الجاف. مبدأ العمل بالمحدد الدوار موضح في الشكل (٢/١٩)، نموذج لشكل العجلة الحرارية في الشكل (٢/٢٠)، وإنشاءات العجلة الحرارية في الشكل (٢/٢١).



شكل (٢/١٩) مجلد دوار



شكل (٢/٢٠) نموذج لشكل عجلة الحرارة



شكل (٢/٢١)

مقارنة المجدد مع المسترجع:

Comparison of Regenerator with Recuperator

- متطلبات المساحة الكلية والحجم الكلي للمجدد عالية جدا مقارنة بالمسترجع المكافئ.
- استخدام المجددات محدود لأفران من الصلب الضخمة (مثل فرن الجمره المكشوفة) وأفران منتجات الكوك الثانوية بنظام وقود الحرق فقط.
- المجددات لها تكاليف رأسمالية وتكاليف صيانة أعلى.
- المجددات تحتاج إلى أعمال مدنية ضخمة.

التسخين المسبق للشحنة الصلبة لاستعادة الحرارة:

تستخدم هذه التقنية كذلك لاستعادة الحرارة من الغازات العادمة الخارجة مثل الأفران الحلقية متعددة الغرف المستخدمة في صناعات الحراريات/ السيراميك، أقطاب الكربون، الأفران الدوارة في صناعة الأسمنت، الأفران النفقية (tunnel) في صناعة السيراميك. في كل هذه الاستخدامات يتم تسخين المسبق للشحنات بالتصاق التيار المعاكس للغازات العادمة والتي بالتالي يتم تبريدها أثناء هذه العملية قبل صرفها. خلال المدخنة. هواء الحرق يتم تسخينه باستخلاص الحرارة من المنتجات الساخنة الخارجة من الفرن.

في الأفران الدوارة، تتدفق المواد التي يتم شحنها بالجاذبية بسبب الميل عند طرف التغذية بينما تتدفق نواتج الحرق في الاتجاه المعاكس. بعد مرور منطقة الحرق، تتحرك المواد الصلبة الساخنة نحو طرف التفريغ ويتم تبريدها بالهواء الجوي الداخل اللازم للحرق. لذلك فإن الهواء يتم تسخينه المسبق قبل وصوله إلى منطقة الحرق النشطة.

في الفرن النفقي، تتحرك الشحنة من نهاية إلى أخرى خلال حامل ميكانيكي مناسب وتمر إلى منطقة التفاعل الساخنة. حواء الحرق يؤخذ من نهاية صرف الشحنة حيث يحدث له تسخين مسبق مع التبريد للشحنة الخارجة. في كلا الحالتين السابقتين،

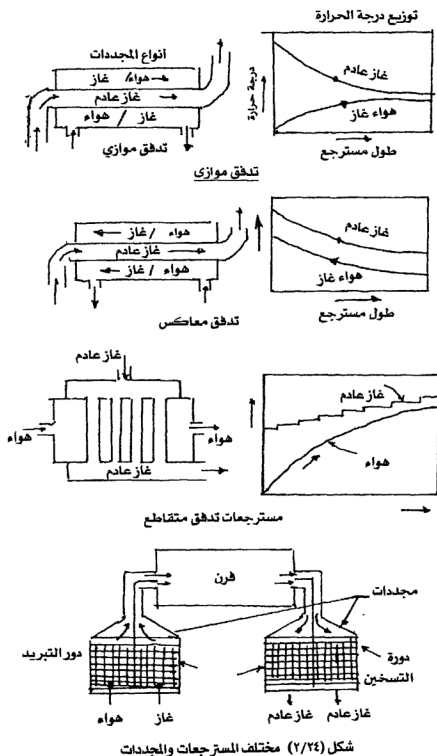
تكون الشحنات متحركة باستمرار داخل الفرن، ولكن في أفران (king) لا يوجد تحرك حقيقي للمواد الصلبة ولكن العملية يتم ضبطها خلال غرف متعددة حيث يوجد تحرك معاكس ظاهري للشحنات والهواء.

باعتبار الكفاءة الحرارية فقط لمنطقة اللهب، فإنه يكون رقم متواضع جدا، ولكن استخلاص الحرارة المفقودة من الغازات العادمة والشحنات الساخنة، فإن الكفاءة يمكن أن ترتفع إلى مستوى أعلى.

تقنيات متنوعة في استعادة الحرارة في محطات الطاقة أي التسخين المسبق لمياه التغذية للغلايات وحرق الهواء، وتحميص البخار... الخ في أفران الغلاية:

التسخين المسبق لمياه تغذية الغلاية يتم خلال المقتصد (economizer). تستخدم تجهيزات التحميص (super heaters - التحميص للبخار عند درجات حرارة عالية) لتحميص البخار الخارج من اسطوانة الغلاية بحيث يتم زيادة الطاقة الحرارية (enthalpy) للبخار مع عدم حدوث تكثيف البخار أثناء التمدد في التربينات.

أخيرا تمر الغازات خلال أجهزة تسخين الهواء للتسخين المسبق للهواء اللازم للحرق، خاصة في حالة وفوق الحرق المطحون لتوفير درجة حرارة لهب مرتفعة. وهذا موضح في الشكل (٢/٢٢).



لذلك فإنه خلال الوسائل السابقة لنظم استعادة الحرارة، فإن الكفاءات الحرارية الكلية لأفران الغلاية يمكن توصيلها إلى مستوى ٨٥ - ٩٠% أو أكثر من ذلك. استعادة الحرارة المفقودة خلال مدخنة الغلاية باستخدام وحدة التسخين الزائد (super heater)، المقتصد (economizer)، وجهاز التسخين المسبق للهواء الحرق (air preheater) يقلل من استهلاك الوقود في الغلاية. الحرارة المفقودة في الغازات العادمة في مدخنة الغلاية عند درجة حرارة مختلفة لمختلف مستويات الهواء الزائد موضع في الشكل (٢/٢٣).

لكل ٢٢ م^٣ خفض في درجة حرارة الغاز العادم بالمرور خلال المقتصد أو وحدة التسخين المسبق للهواء، يوجد وفر بنسبة ١% من وقود الغلاية. هذا يعني أنه لكل ٦ م^٣ ارتفاع في درجة حرارة مياه التغذية للغلاية خلال المقتصد أو ٢٠ م^٣ ارتفاع في درجة حرارة هواء الحرق خلال جهاز التسخين المسبق للهواء، فإنه يتم توفير ١% من الوقود. ولكن درجة حرارة غاز المدخنة العادم مع معدات استعادة الحرارة هذه (preheater, economizer, superheater) يجب ألا تقل عن نقطة الندى (dew point) وذلك لحماية طوب المدخنة، ريش المروحة الداخلية، والمواسير المعدنية الأخرى والمعدات من مخاطر التآكل.

مختلف المسترجعات والمجددات موضح في الشكل (٢/٢٤).

اقتصاديات الوقود في الأفران:

الوسائل المستخدمة للمحافظة على الحرارة أي اقتصاديات الوقود في الأفران تؤكد أدائها الاقتصادي. عمليات الفرن ذات المستويات العالية لدرجات الحرارة تكون ذات فقد حراري كبير، لذلك فإن استعادة الحرارة يجب أن تتم في هذه الحالة. الفقد الكبير يكون في الغازات العادمة والإشعاع من حوائط الفرن.

الغازات العادمة تحتوي على كل من الحرارة الملموسة (sensible heat) والحرارة الكامنة أو المختزنة (latent heat) تبخر المياه وأحياناً الحرارة الكامنة (لغازات الوقود

التي لم تحترق). استعادة حرارة البخر للماء ليس عمليا ويتم التحكم في الحرارة الكامنة في الغاز العادم بتوفير الهواء الكافي للحرق وكذلك الخلط المناسب للوقود والغاز.

الفقد الكلي في حرارة الغاز العادم يمكن خفضه إلى أدنى مستوى بتوفير الهواء الكافي للحرق فقط، ويمنع تسرب الهواء إلى الداخل (Infiltration). درجة حرارة الغاز العادم يتم خفضها واستعادة الحرارة بالمبادل الحراري مثل المجددات، والمسترجعات وغلايات الحرارة العادمة.

تنسيب الوقود – الهواء (Fuel - Air Proportioning)

الإمداد بهواء الحرق يجب أن يكون أعلى من المتطلبات النظرية بقدر صغير. في الأفران المدنية، كل نقط التسرب في الأفران في نظام الفرن يتم لحامها لمنع دخول الهواء ويتم نفخ الكمية المحكمة خلال المجددات. التنسيب الدقيق الآلي للوقود والهواء يحسن من اقتصاديات الوقود، كفاءة الفرن والتحكم في العملية. استخدام جهاز تحليل الأكسجين (O_2 -analyser) على نواتج الحرق يؤدي إلى تحسين اقتصاديات الوقود والكفاءة. أحد أهم العوامل ذات التأثير على الكفاءة الجيدة للوقود هو الفقد في الشحنة، أي تلك النسبة من طاقة الوقود المنطلقة والتي تحمل خارج الفرن كحرارة ملموسة للغازات العادمة. العوامل الهامة التي تتحكم في هذا المعيار هي حرارة الغاز العادم الذي يترك الفرن ومحتواها من الأكسجين (المرتبط بإنتاج الهواء المستخدم في الحرق أعلى من المتطلبات المحددة والمتطابقة نظريا أي النسبة المئوية للهواء الزائد). العلاقة العامة بين النسبة المئوية للمحتوى من الأكسجين والنسبة المئوية للهواء الزائد لكلا الوقود ذو قيمة حرارية (مثل غاز الفرن العالي) والوقود الغني (مثل غاز فرن الكوك، زيت الوقود الثقيل... الخ) موضح في الشكل (٢/٢٥). العوامل التي تساهم في فقد المدخنة خلال قيم القدرات الحرارية للغازات العادمة (التي تشمل O_2 , N_2 , CO_2 , CO) موضحة في الشكل (٢/٢٦) حيث الصفة الواضحة هي المحتوى العالي من الحرارة لثاني أكسيد الكربون (عند أي درجة حرارة معينة) أكثر من أي مكونات للغاز العادم.

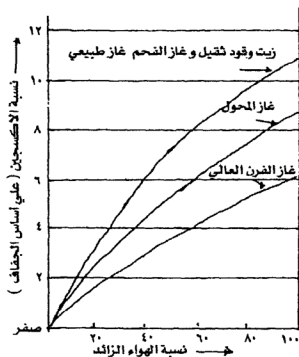
بخلاف بخار الماء فإن الغازات الأخرى يكون سلوكها مماثل.

هذه البيانات مع بيانات الحرق المناسب تستخدم لحساب فقد المدخنة شكل (٢٧/
٢) الذي يوضح فقد المدخنة لغاز الفرن العالي (أي وقود الغاز ذو أدنى قيمة حرارية)
ولغاز فرن الكوك (الغاز الغني أي الوقود الغاز ذو قيمة حرارية عالية) أعلى من
مجال درجة حرارة الغاز العادم والنسبة المئوية للهواء الزائد. وهذا يظهر بوضوح.
تأثير درجة حرارة الغاز العادم مثال حتى غاز الوقود ذو قيمة حرارية عالية،
فإن حوالي ٥٠% من إمدادات الطاقة تنتهي في الغازات العادمة عند درجة حرارة
حوالي ١٠٠٠ °م.

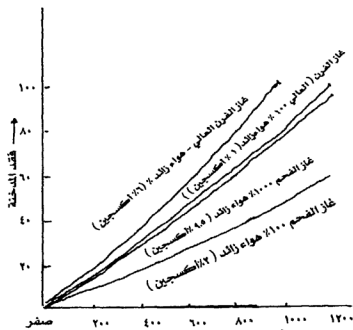
في حالة الوقود الغاز ذو قيمة حرارية منخفضة، حتى مع التحكم الجيد في
الحرق فإن معظم الإمداد بالطاقة يترك خلال المدخنة عند درجات حرارة منخفضة
مثل ٦٠٠ °م.

وقود الغاز الضعيف يمكن توضيحه بحقيقة أن غاز الوقود الضعيف مع
التحكم الجيد في الحرق لا يكون أفضل من غاز CO عند هواء زائد ١٠٠% (أي
مستوى ضعيف جداً من التحكم في الحرق).

العلاقة بين فقد المدخنة لبعض غازات الوقود عند هواء زائد ١٠% (المستوى
الطبيعي المقبول للتحكم في الحرق) موضح في الشكل (٢/٢٨)، والذي يظهر أن
الوقود ذو القيمة الحرارية العالية يكون سلوكه بالمثل تماماً.

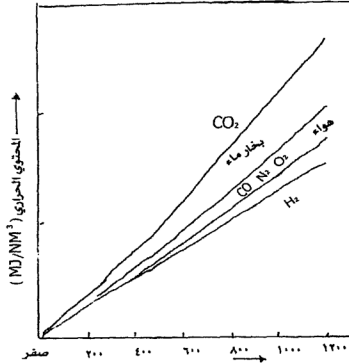


شكل (٢/٢٥) العلاقة بين نسبة الأكسجين في الغازات العامة والهواء الزائد

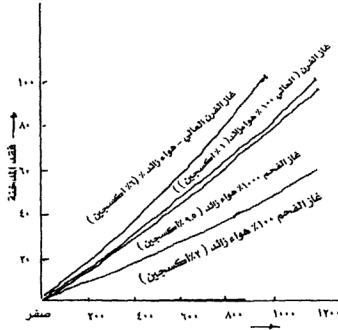


شكل (٢/٢٧) تأثير نسبة زيادة الهواء ودرجة العادم

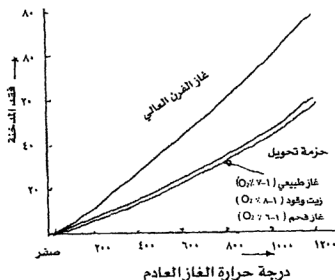
2



شكل (٢/٢٦) المحتوى الحراري للمكونات العادية للغازات العادمة



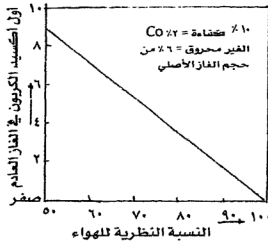
شكل (٢/٢٧) تأثير نسبة زيادة الهواء ودرجة العادم



شكل (٢/٢٨) علاقة مختلف الوقود الغاز عند
هواء زائد ١٠٠%

في حالة الفقد المنخفض للمدخنة، بما يعني الاستخدام الكفء للوقود، يجب التأكيد على ضمان الحرق الجيد. الشكل (٢/٢٩) يوضح تأثير استخدام الهواء الغير كافي لحرق الغاز الطبيعي. وذلك يظهر الآتي:

- ١٠% نقص في هواء الحرق يمكن أن يسبب إنتاج المكافئ من عدم الحرق للفقد في الطاقة المنبعثة المكافئ إلى ٦% من الغاز الأصلي.
- حتى في حالة وجود الإمداد الكافي من هواء الحرق، فإن نقص في المحتوى من الأكسجين بنسبة ١% (يفرض الغاز الطبيعي المنتج للغاز العادم عند ٧٠٠ °م) سوف يؤدي إلى خفض فاقد المدخنة بنسبة ١%.



شكل (٢/٢٩) المحروق و الغير محروق في الغاز العادم للغاز الطبيعي

إثراء هواء الحرق بالأكسجين:

الهواء يتكون أساسا من ٢١% (بالحجم) من الأكسجين والباقي نيتروجين خامل وذلك وعند حدوث الاشتعال، يتحد الأكسجين مع الكربون ومع الهيدروجين في الوقود ويطلق حرارة. الغازات الخاملة للهواء تمتص الحرارة من الحرق وتحملها خارج الفرن بما يسبب الفقد، فهي تقلل درجة حرارة اللهب بامتصاص الحرارة وبذا خفض معدل الانتقال الحراري للشحنة.

في حالة إمكانية خفض المحتوى الخامل في الهواء، فإنه يمكن الحصول على اشتعال وحرق أكثر كفاءة. يمكن عمل ذلك لإضافة الأكسجين إلى هواء الحرق. زيادة المحتوى من الأكسجين يقلل المحتوى من المكونات الخاملة في الهواء، وبالتالي فإنه عند حرق كمية معينة من الوقود باستخدام الهواء الذي تم إثراؤه بالأكسجين، فإن حجم الغازات العادمة سيكون أقل من حالة استخدام الهواء العادي. في حالة عدم زيادة درجة حرارة الغاز العادم، فإن الفقد في الحرارة الملموسة في الغاز العادم سيقبل بسبب السعة الحرارية الأصغر للحجم الأصغر. في الأفران التي تعمل عند أحمال حرارة عالية جدا، فإن خفض الخامل ينتج عنه خفض في درجة حرارة الغاز العادم. مع نفس

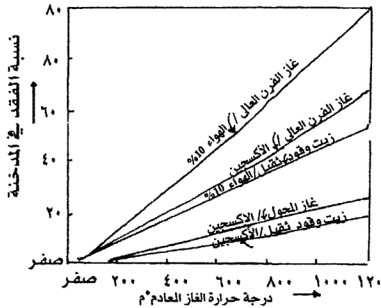
المدخلات من الوقود، فإن الهواء الذي تم إثراؤه للحرق يرفع درجة حرارة اللهب لوقود معين وبذا زيادة معدل الانتقال الحراري وزيادة معدل الإنتاج. يمكن خفض مدخلات الوقود وذلك عند استخدام الهواء الذي تم إثراؤه بالأكسجين، لاستمرار نفس معدل الإنتاج كما تم الحصول عليه باستخدام وقود أكثر واستخدام الهواء العادي. استخدام الأكسجين النقي موضح بنقص فقد المدخنة للوقود كما هو موضح في الشكل (٢/٣٠). النقطة الحقيقية الواضحة هي نقل الغاز ذو الطاقة الحرارية الضعيفة ليكون قادرا على الوقود ذو الطاقة الحرارية العالية للوقود عند الحرق بالهواء البارد - هذا بدون درجة اللهب العالية التي تحد الاستخدام حيث الأكسجين النقي/ الوقود عالي القدرة الحرارية يمكن استخدامه.

استخدام الأكسجين لإثراء هواء الحرق أي أن هواء الحرق الثري بالأكسجين يوفر طريقة للحصول على مقياس في خفض فاقد المدخنة عند استخدام الأكسجين لحرق الوقود ذو الطاقة الحرارية العالية مع السلبات الفنية المصاحبة لاستخدام الأكسجين النقي.

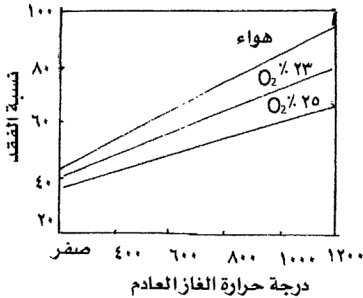
الشكل (٢/٣١) يوضح تأثيرات حرق وقود الزيت مع الإثراء بالأكسجين حتى ٢٥ % أكسجين، الذي يبين أن ١% زيادة في إثراء الأكسجين يقلل فقد المدخنة عند ١٠٠٠ °م بحوالي ٣%. عند استخدام البخار لترزير زيت الوقود، فإنه يؤثر على استهلاك الوقود بشكل عكسي وذلك بطريقتين:

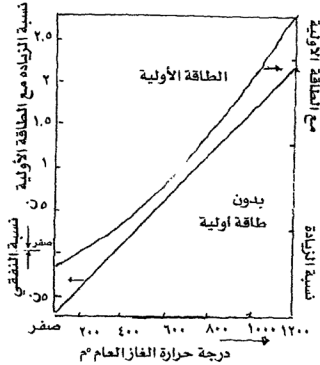
- بالحاجة إلى تسخين البخار المستخدم من درجة حرارة الإمداد إلى حالات العادم.
- هذا بالإضافة إلى فقد المدخنة المصاحب للوقود المطلوب لتوفير هذه الحرارة الإضافية.

التأثير السلبي لاستخدام بخار الترزيز بمعدل ٠,٥ كجرام بخار لكل كيلوجرام زيت موضح في الشكل (٢/٣٢). هذا له تأثير صغير ولكن إيجابي على فقد المدخنة المؤثر، عادة ١% عند درجة حرارة الغاز العادم حول ١٠٠٠ °م.



شكل (٢/٣٠) الحرق بالأكسجين النقي

شكل (١/٣١) هواء الحرق الذي تم إثراؤه بالأكسجين
زيت وقود ثقيل / هواء حرق عند ١٠٠ % زيادة



شكل (٢/٣٢) تأثير تركيز البخار على خفض / زيادة متطلبات الطاقة

التحكم في ضغط الفرن : (Furnace Pressure control)

إذا كان ضغط الغازات في غرفة التسخين للفرن أقل من الضغط الجوي، فإن الهواء الخارجي البارد سوف ينسحب إلى داخل الفرن خلال أي فتحات موجودة. إذا كان الضغط الداخلي أعلى من ضغط الهواء الخارجي، فإن الغازات الساخنة سوف تدفع خارج الفرن خلال تلك الفتحات وإذا كان عالي سيكون بالإضافة إلى ذلك محاولة اختراق الحرارية والتسخين الزائد للفرن مسببا التلف.

لذلك، يكون المطلوب عموماً أن يعمل الفرن مع قليل من الضغط الزائد قليلاً في غرفة الحرق (أي ضغط الفرن أعلى قليلاً عن الضغط الجوي). الضغط من القمة إلى القاع لغرفة الحرق ليس متجانساً بسبب تأثير المدخنة للغازات العادمة. لذلك فإنه يقصد بالتحكم المحافظة على الضغط المطلوب عند مستوى المجرى . دفع الهواء إلى

الفرن الذي يعمل عند ضغط سالب يغير نسبة الوقود الهواء والتي يتم التحكم فيها آلياً. في مثل هذه الأفران مثل تلك لإعادة التسخين أو للمعالجة الحرارية، فمثل هذا الهواء يزيد من خطورة مشكلة الأكسدة (الترسبات - scaling) للشحنة بسبب وجود الأكسجين.

إذا كان الضغط في الفرن عند الضغط الجوي أو حدوث ظروف تسخين موجبة أفضل بتطوير الانتقال الحراري وبالتحكم الجيد لتجانس درجة الحرارة. فإن الضغط الموجب يجب أن يتم التحكم فيه لمنع خروج اللهب من فتحات الفرن وكذلك لتجنب تراكم الضغط الخلفي الذي يمكن أن يتداخل مع التدفق المناسب لغاز الوقود والهواء. يتم التحكم في ضغط الفرن بضبط الفتحات في صمام منظم التيار في المدخنة. خروج اللهب هو دلالة للضغط الموجب.

الغاز العادم المفقود مباشرة من فتحات الفرن بسبب خروج اللهب يكون عادة أكثر سخونة عن ذلك الخارج بالطريق العادي، دخول الهواء يخفض درجة حرارة الغاز العادم والذي يمكن أن يقلل كفاءة استعادة الحرارة. الإجراءات العلاجية لخفض خروج اللهب أو دخول الهواء في الفرن تشمل التحكم الجيد في ضغط الفرن، فقط أبواب الفرن والأداء الهندسي الجيد لإدارة أعمال الفرن. العوامل المساعدة على خروج اللهب من الفرن ودخول الهواء إلى الفرن موضحة في الآتي:

• خروج اللهب من الفرن:

- الضغط العالي للفرن، وخاصة عند النقطة العالية للفرن
- أبواب الشحن المفتوحة.
- الدفع العالي للموقد نحو أبواب الشحن.
- الفتحات والفراغات في بناء الفرن وخاصة السقف.

• دخول الهواء يحدث للآتي:

- أبواب الشحن المفتوحة للأفران التي تعمل عند ضغط سلبي (تفريغ).

- السحب العالي المصاحب للحرارة العادمة للغلايات.
- ضعف التحكم في ضغط الفرن.
- الفتحات والنقوب في بناء الفرن وخاصة عند مستوى المجرمة.
- ميول التفريغ العليا لأفران إعادة التسخين بضغط الموقد والطفو.

التحكم في درجة حرارة الفرن:

زيادة كمية زائدة من الوقود يعتبر إتلاف وينتج عنه ارتفاع درجة حرارة الغازات الخارجة وتدمير للحراريات. المعدلات العالية للوقود يعجل من معدل الانتقال الحراري للمادة وقد يسبب لها التلف في بعض الحالات. استخدام الوقود الغير كافي يقلل من معدل الانتقال الحراري ويطيل زمن العملية. والمعدل المناسب للوقود لحماية كل من المادة الجاري تسخينها أو لحماية حراريات الفرن وعادة للتحكم في معدل الإنتاج أو التسخين، يتم استمراره بقياس درجة الحرارة آليا.

العزل:

مواد العزل متوفرة للمحافظة وترشيد استخدام الوقود، لتوفير ظروف عمل أكثر أمانا وراحة، لحماية المواد المعرضة للتلف بفعل الحرارة/ والضغط الحراري ولتعجيل عمل الفرن.

الفصل الثالث

3

الانتقال الحراري في الأفران

Heat Transfer in Furnaces

ففي أي عملية انتقال، يكون إجمالي التدفق للمتاح بسبب تأثير القوة الدافعة. معدل الانتقال هو تدفق وشدة القوة الدافعة هي فرق الجهد. أساس عملية الانتقال هو أنه توجد علاقة طولية بين التدفق والتدرج في الجهد. في جميع الحالات، عمليتي الانتقال أو حركة التدفق تحدث في اتجاه انخفاض الجهد. في حالة الانتقال الحراري، الفرق في درجة الحرارة هو الجهد. عموماً، معدل التدفق يتناسب طردياً مع فرق الجهد ويتناسب عكسياً مع المقاومة ويمكن التعبير عنه بالمعادلة العامة الآتية:

$$\text{النّيار} = \frac{\text{الجهد}}{\text{المقاومة}}$$

الانتقال الحراري:

الانتقال الحراري يتعامل مع معدل تبادل الحرارة بين الأجسام الساخنة والباردة والذي يسمى المصدر والمستقبل على التوالي. تدفق الحرارة نحو درجة الحرارة المنخفضة، المعدل يتوقف على فرق درجة الحرارة بين المصدر والمستقبل. في حالة البخار أو التكثيف يحدث الانتقال الحراري وتمتص الحرارة أو تنبعث عند

درجة حرارة ثابتة في جانب واحد، كما هو الحال بالنسبة لاكتساب أو فقد الطاقة الداخلية على التوالي.

عملية الانتقال الحراري:

عملية الانتقال الحراري تتعامل مع معدلات الانتقال الحراري كما تحدث في معدة الانتقال الحراري للعمليات الهندسية. المشكلة المتعلقة بعملية الانتقال الحراري ترجع إلى كميات الحرارة المطلوب نقلها، المعدل الذي سيتم انتقالها به بسبب طبيعة الأجسام، القوة الدافعة، درجة التنظيم للسطح الفاصل بين المصدر والمستقبل وكمية الطاقة الميكانيكية التي يمكن استخدامها لتسهيل الانتقال. نظرا لأن الانتقال الحراري يتضمن عملية التبادل، أي الفقد في الحرارة من جسم يساوي الحرارة المكتسبة بالآخر خلال منظومة محتجزة.

آلية الانتقال الحراري:

يوجد ثلاث أشكال التي فيها قد تمر الحرارة من المصدر إلى المستقبل. هي التوصيل (conduction) ، الانعكاس (convection)، الإشعاع (radiation). في معظم التطبيقات الهندسية يحدث أكثر من واحد في نفس الوقت.

التوصيل: (Conduction)

التوصيل هو انتقال الحرارة خلال مادة ثابتة مثل حائط ثابت. اتجاه تدفق الحرارة يكون بزاوية قائمة بالنسبة للحائط في حالة كون السطح متساوي الحرارة وأن الجسم متجانس. كمية الحرارة المتدفقة في وحدة الزمن (dq) تتناسب طرديا مع المساحة (A) والفرق في درجة الحرارة (dt) وتتناسب عكسيا مع السمك (dx) عند زوايا قائمة نحو اتجاه التدفق.

المعادلة الأساسية طبقا لقانون فوريير (fourier's law):

$$dq = -KA \frac{dt}{dx}$$

حيث:

K = التوصيل الحراري للمادة.

التوصيل الحراري في الأفران الصناعية من الأمور العادية جدا حيث تكون الفروق في درجة الحرارة للأسطح الداخلية والخارجية مرتفعة إلى حد ما. حوائط الفرن تكون مصنعة من طبقات الحرارية ليتحمل درجة الحرارة العالية لنواتج حرق الغاز يليها مواد العزل لخفض الفقد الحراري نحو الوسط المحيط. طبقات الحرارية يمكن أن تكون بأشكال مختلفة ما بين الحوائط المستوية إلى الطبقات الأسطوانية. معدلات الانتقال الحراري خلال تلك الطبقات يتم حسابها بتعيين محصلة مجموع المقاومة وإجمالي الفرق في درجة الحرارة بين المصدر والوسط المحيط. المعدلات لمختلف أشكال إنشاء حائط الفرن متعدد الطبقات هي كالآتي:

$$q = \frac{\Delta t_{Overall}}{\frac{K_1}{K_1 A} + \frac{L_2}{K_2 A} + \frac{L_3}{K_3 A}} \quad \text{للحوائط المستوية}$$

للطبقة الأسطوانية المفرغة (q) =

$$q = \frac{\Delta t_{Overall}}{\frac{\Delta r_1}{K_1 A l_{m1}} + \frac{\Delta r_2}{K_2 A l_{m2}} + \frac{\Delta r_3}{K_3 A l_{m3}}}$$

حيث:

A_{lm} = متوسط المساحة اللوغاريتمية (logmean area) للطبقات المستقلة للطبقات الداخلة وهكذا.

$$\left(\frac{A_2 - A_1}{\ln \frac{A_2}{A_1}} \right)$$

التحكم في جو الفرن (Control of Furnace Atmosphere)

تسخين المعادن والسبائك ومعالجتها الحرارية تتطلب ظروف خاصة للجو المحيط لتحسين الخواص الطبيعية. الجو داخل الأفران يمكن أن يكون من الأنواع الآتية (طبقاً للمهام المحددة المفروض أن تقوم بها الأفران).

- جو مؤكسد (مثال. في فرن الغلاية).
- جو مختزل (مثال. في الفرن العالي).
- جو كربنة/ وإزالة الكربنة (مثال جو - L.D.Converter).
- جو النترجة (nitriding) (كما في حالة عملية التفسية السطحية).
- جو متعادل/ خامل (في فرن تليدين الصلب annealing).

في كثير من العمليات التي يتم فيها تسخين المادة يكون من المهم استمرار جو خاص لدخل الفرن ملتصقاً بالمعدن. في الفرن الذي يتم تسخينه داخلياً بواسطة الغاز، يمكن التحكم في الغاز لتوفير جو مؤكسد أو جو مختزل.

في بعض الحالات تتضمن المعالجة الحرارية للمعادن المعالجة الكيميائية للطبقات السطحية (مثال الكربنة أو النترجة - carburising and nitriding). والتي تتم في جو محكم بإتقان. في حالات أخرى، يتم التحكم في جو الفرن لمنع حدوث عدوانية على سطح المعدن (مثل، الأكسدة، ترسيبات، إزالة الكربون، أو اختراق الكبريت).

في بعض الحالات يتم إنتاج جو خارجي للفرن (مثل الجو المتعادل لتليدين وتقوية الصلب يتم بالنيتروجين) والإمداد له. في تطبيقات كثيرة CO، بخار الماء تعتبر عوامل مؤكسدة (بصرف النظر عن أي أكسجين حر موجود)، وكلا من H₂O، CO هما عوامل اختزال. النيتروجين يوفر جو خامل.

الجو المؤكسد:

في أفران التسخين عند درجة الحرارة المنخفضة (أقل من ٧٠٠ °م) فإن الجو المؤكسد لا يسبب كثيرا من تكون مادة القشور (scaling) بسبب وجود الأكسجين الحر في الغاز العادم. إذا كان الجو مؤكسدا عندئذ يستخدم قليلا من الهواء الزائد لإكمال الاحتراق وتوفير الجو المطلوب. في فرن الاشتعال بغاز الفحم عادة يتم ضبط نسبة ١٠,٥ % CO₂، ١,٥ % O₂ في الغاز العادم والذي يوفر جو مؤكسد معتدل.

الجو المختزل:

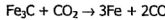
وجود CO، H₂ وعدم وجود O₂ في الغاز العادم من الفرن هو دلالة للجو المختزل في الفرن. عند إعادة ظروف الفرن لتكون مختزلة (كما في حالة تقسية الصلب) فإن التحكم في الهواء الأولي والثاني يتم تنظيمها مع مثبط العادم لإعطاء ستارة من اللهب عند فتح باب الفرن. قطعة من الورق عند إلقتها في الفرن سوف تنفحم ولكن لا تشتعل. هذا الاختبار العملي يبين عدم وجود الأكسجين ولكنه لا يعطي أي بيان عن كمية CO الموجودة. تحليل الغاز سوف يبين حوالي ١ - ٢ % CO في الغازات العادمة طبقا للعملية. الجو المختزل في الفرن يتم توفيره بضبط كمية الهواء الثانوي بحيث أن كمية صغيرة من CO تكون موجودة في غازات الفرن. الجسيمات الكربونية مثل الدخان لا تسبب وجود جو مختزل في الفرن.

جو الكربنة:

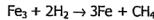
غازات الهيدروكربونات تحدث كربنة لسطح الصلب عند درجة حرارة التلدين.

جو إزالة الكربنة:

وهذا يشمل إزالة الكربون من كربيد الحديد (Fe₃C) وبذا التأثير على البناء البللوري للصلب. CO₂ يزيل كربنة الصلب، بينما CO يسبب الكربنة.



الهيدروجين كذلك يزيل الكربون عند درجة الحرارة العالية (عند تكون الميثان).



لذلك، فإن إضافة CH_4 إلى الجو يقلل إزالة الكربون بالهيدروجين. النيتروجين في وجود البخار يزيل الكربون من الصلب عالي الكربون. في عدم وجود البخار، يكون خاملاً.

جو النترجة:

النيتروجين النشط المتكون بتكسير الأمونيا عند سطح المعدن يسبب تكون النيتريد مع زيادة صلابة السطح.

الجو المتعادل:

في حالة التلدين لغطاء لفات الصلب يستخدم غاز متعادل/ خام للحماية (٩٥% $H_2O + N_2$)، بحيث، لا يمكن تحمل جو الأكسدة أو الاختزال لفات الصلب.

التسخين الخارجي للأفران:

في أفران التلدين اللامع، يلزم جو محكم للحصول على الخواص الطبيعية المطلوبة للمعادن، وذلك بعدم حدوث قشور، إزالة الكربون وتفاعلات كيميائية أخرى (عادة بسبب الكبريت أو الأكسجين الذي يتلف سطح المعدن). يتم ذلك في أفران ذات التسخين الخارجي حيث أن التحكم الضروري في الفرن لا يمكن تحقيقه في حالة دوران غازات الحرق في الفرن. يتم تسخين الفرن بطريقة غير مباشرة والغازات المكونة لجو الفرن يتم إنتاجها منفصلاً.

الفصل الرابع

4

تقسيم الأفران

تنقسم الأفران من وجهات النظر المختلفة وذلك لمعرفة الأنواع التي تمثل الأفران الصناعية المختلفة والتي تشمل أساساً أجزاء رئيسية ثلاث:

- المكان الذي يتم فيه الحرق.
- غرفة العمل للفرن حيث يتم انتقال الحرارة من نواتج الحرق إلى المواد تحت التسخين وتجهيزات إزالة الغازات العادمة.
- تقسيم الأفران المبني على عوامل مختلفة هو كالاتي:

المبني على مصدر الحرارة:

- أفران الحرق/ اللهب: وهذه الأفران حيث الحرارة نتيجة حرق الوقود.
- الأفران الحرارية - الكهربائية: في هذه الأفران يتم توليد الحرارة بواسطة الكهرباء.

المبني على نوع الوقود المستخدم:

- أفران حرق الوقود الصلب.
- أفران حرق الوقود السائل.
- أفران حرق الوقود الغاز.

- أفران ذات الحرق المختلط - هنا يحدث الحرق لنوعين أو أكثر من الوقود حيث يتم الاستخدام في نفس الوقت.

المبني على طرق الانتقال الحراري من الوقود للشحنة تحت التسخين:

- الأفران حيث الوصول على اتصال مباشر بالمادة تحت التسخين - مثال أفران صناعة الذهب وأفران الحداد ذات اللهب المفتوح.
- الأفران التي يتم فيها تسخين الشحنة بنواتج الحرق، مثال أفران المعالجة الحرارية.
- الأفران التي يتم فيها تسخين المادة بطريقة الانتقال الحراري خلال حائط صلب مثال أفران الغلاية.
- الأفران التي يحدث فيها انتقال الحرارة خلال المجال السائل المحيطة للمادة المغمورة تحت التسخين مثال أفران حمام الملح أو أفران حمام الرصاص.

المبني على أجهزة الحفاظ على الحرارة:

- أفران الاسترجاع: هنا الغاز العادم والهواء يدور في مسارات متغيرة والحرارة الممتصة بحوائط المسارات من الغاز العادم الساخن التي تؤخذ بعيدا بالماء البارد.
- أفران التجديد: هنا، يتم مرور الغاز العادم خلال غرف ترابيع من الطوب بالتبادل بعد فترة زمنية محددة. الهواء البارد أو الغاز المار فوق ترابيع الطوب يأخذ جزء من الحرارة المتراكمة بواسطة ترابيع الطوب والحرارة والأخير يبدأ ثانيا في امتصاص الحرارة من الغاز العادم.

المبني على نظام الشحن:

- أفران الشحن اليدوي.
- أفران الشحن الميكانيكي.

المبني على نظام العمل:

- أفران الدفعة الواحدة (batch) مثال فرن الدست (cupola).
- الأفران التي تعمل من آن إلى آخر (periodic) مثل أفران التلدين، أفران الكوك....الخ.
- الأفران المستمرة مثل فرن حوض الزجاج، فرن إعادة التسخين...الخ.

المبني على السحب (Draught)

- أفران السحب الطبيعي/ الذاتي: تعمل بمدخنة أو بآبواب مفتوحة.
- أفران السحب عنوة: هنا يستخدم مراوح السحب عنوة للإمداد بهواء الحرق وكذلك لإزالة الغاز. هذا عادة يعمل عند ضغط موجب.
- فرن السحب الحثي (Induced Draught): في هذا الفرن حيث مروحة السحب تكون موضوعة عند قاع سحب المدخنة لسحب الغاز العادم إلى خارج الفرن - بحيث تكون عند ضغط سلبي (تفريغ).
- فرن السحب المتوازن (balanced draught): في هذا الفرن يتم توفير كلا من مروحة السحب عنوة للإمداد بهواء الحرق ومروحة لسحب الحثي لسحب الغاز العادم إلى الخارج.

المبني على كل الفرن:

- فرن البوتقة (crucible)
- فرن عالي (blast)
- فرن المجرمة (hearth)

المبني على الغرض:

- الصهر.
- التحميص (roasting)
- إعادة التسخين.

مبني على الطريقة التي يتم بها تداول الشحنة:

- فرن قائم (shaft) [ذو حوض يشحن من أعلى ويفرع من أسفل]
- فرن نفقي Tunnel
- فرن لافح (للإحماء الخارجي) muffle
- فرن دافع - مروحة خلفية دافعة pusher
- فرن حمام - ثابت/ مائل/ دوار.

مبني على الصناعة المستخدمة للفرن:

أ- فرن إعادة تسخين الصلب: فرن الحرق الغاز للتسخين المستمر للكتلة الحديدية

- نوع الدفع (pusher)

- نوع حفرة السقي

- نوع كمره السير (walking beam)

ب- إنتاج - الحديد الخام - الفرن العالي.

ج- إنتاج حديد صلب عقدي (عالي المطيلية) (nodules)

- في أفران دوارة

د- صناعة مسبوكات الحديد - فرن الدست المقيد (cupola)

هـ- الصناعية الكيميائية:

- أنبوبة التقطير بالأشعة radiant pipe still

- فرن البوتقة أو القدر pot furnace

و- مصهورا صغيرة للحديد والصلب - فرن البوتقة بحرق الكوك.

ز- أفران تصنيع الصلب:

- الجمره المفتوحة open hearth

- فرن الأكسجين القاعدي.

- محول بسمر

ح- المعالجة الحرارية للصلب:

- فرن التجديد المنعكس من نوع bogie
- فرن تقوية شرائط الصلب.

ط- فرن الطوب الحراري:

- فرن خلية النحل بالحرق بالفحم لحرق الحراريات.
- أتون الطوب المستمر (أتون - kiln) لتجفيف الطوب.

ي- المعادن الغير حديدية:

- الفرن الدوار المائل بإشعال الزيت.
- الفرن العاكس (reverbaratory)
- فرن الصهر الدوار الصغير للنحاس الأصفر (brass)
- الفرن الدوار المائل بإشعال الزيت.
- فرن البيوتقة المائل بإشعال الزيت.

ك- حرق الأسمنت والجير:

- الأتون الدوار بالتدفق المعاكس والإشعال بالوقود المطحون.
- الأتون القائم (يشحن من أعلى ويفرغ من أسفل) باللهب المباشر.

صهر الزجاج:

- حمام التجديد بالحرق بالغاز (regenerative bath)
- فرن البيوتقة - زيت/ غاز الإنتاج والإشعال بالإحماء الخارجي (muffle) بالاسترجاع أو بالتجديد (recuperative/ regenerative).

رفع البخار: (Steam Raising)

- فرن البوابة الثابتة أو البوابة المتحركة - الإشعال في الغلاية.
- أفران حرق الفحم المطحون.
- الإشعال الرأسي.
- الإشعال المماس.

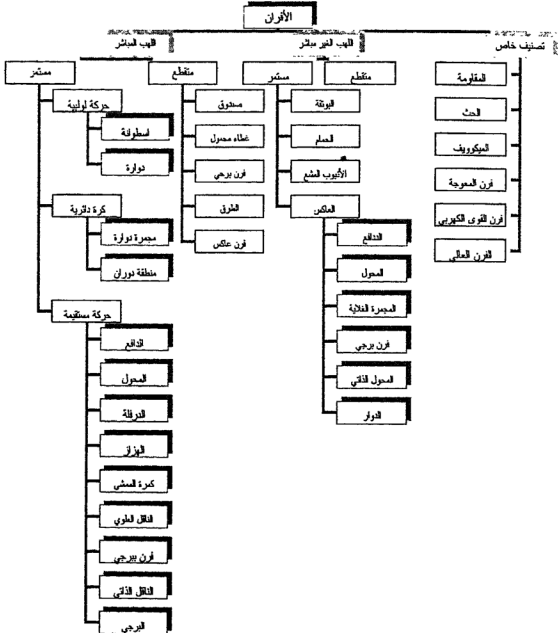
- أفران الطبقة السائلة.
- أفران حلزونية.

الكربنة: (Carbonisation)

- صناعة الغاز - أفقي - فرن عاكس يحرق الغاز - فرن عاكس يحرق الغاز متقطع.
- رأسي مستمر - حرق الغاز عاكس بالتدفق المعاكس.
- فرن خلية النحل.
- فرن المنتج الثانوي.
- نوع المجدد.
- نوع الحرارة المفقودة.
- الفرن المجدد، الدوار، ذو العادم المزدوج، المركبة.

لا يوجد تصنيف واحد مناسب للفرن حيث يمكن أن يكون فرنين متشابهين بالنسبة لعملية واحدة ولكنهما غير متشابهين تماما من وجهة نظر عملية أخرى. فمثلا، كلا نوعي فرن النحاس الأصفر (brass) يشبهان فرن المجرم المكشوفة بالنسبة لعملية الانتقال الحراري من الفرن إلى الشحنة ولكنهما غير متماثلين من وجهة نظر الإشعال. لذلك فإن تقسيم الفرن لا يفيد كما يفيد التقسيم للعمليات التي تحدث في الفرن. التقسيم الكبير للأفران موضح في الشكل الآتي:

جدول () التقسيم العام للأفران



الفصل الخامس

5

حسابات الميزان الحراري للفرن Furnace Heat Balance Calculations

الميزان الحراري للأفران هو طريقة لتعيين الكفاءة الحرارية للعملية ومقارنة القيم النسبية لفقد الحرارة، وذلك بالمقارنة بعملية متشابهة معروفة. مساحات عدم الكفاءة يمكن التعرف عليها حيث يمكن حدوث تغير في المعدة أو التحكم في العملية أن ينتج عنه تحسن في الكفاءة.

يمكن عمل الميزان الحراري على عملية، أو جزء من عملية أو على من العمليات حيث يجب أنزان الكتل (عدا في حالة عملية الانقسام/ الاندماج النووي)، والطاقة/ الحرارة التي يتم الإمداد بها يجب أن تساوي لتلك المستخدمة أو المصدرة. درجة الدقة التي بها تتطابق بها كل بنود المدخلات مع كل بنود المخرجات تعكس الدقة التي بها يتم حساب الميزان. نسبة الحرارة التي لا يتم حسابها يجب أن تكون أقل من ٥% من الكلي في الميزان الحراري الجيد.

معييار درجة الحرارة التي هي عادة من صفر إلى ١٥ °م يلزم تثبيته للميزان الحراري الذي يتم حساب الحرارة المحسوسة بالإشارة إليه. كل بنود المدخلات والمخرجات في الميزان الحراري يجب أن يعبر عنه بنظام ثابت من الوحدات الحرارية. أحيانا، كان الميزان الحراري يتم بالإشارة إلى وحدة الكم للآتي:

- المادة الخام.

- المنتج الرئيسي.
- الوقت.

- الوقود القياسي بقيمة حرارية ثابتة.

بنود المدخلات الحرارية في الميزان الحراري:

يمكن أن تحتوي على أو من كل البنود الآتية:

- التسخين المسبق في هواء الحرق.
- الطاقة الحرارية في الوقود.
- الحرارة المحسوسة/ التسخين المسبق في الوقود.
- الحرارة الناتجة عن التفاعل.
- الحرارة الملموسة أو الحرارة المسبقة في المواد الخام.
- الحرارة الكلية للبخار مثل البخار المستخدم لترزيز الوقود السائل.
- الحرارة المكافئة لأشكال أخرى من الطاقة مثل الطاقة الكهربائية للتسخين، قوة الطلمبة أو المروحة....الخ.

بنود مخرجات الحرارة في الميزان الحراري:

البنود المختلفة للحرارة الخارجة قد تشمل أي أو كل من:

- الحرارة الملموسة + الحرارة الكامنة مثال إجمالي الحرارة في المنتج.
- الحرارة الممتصة في التفاعل الكيميائي.
- الحرارة الكلية في الغاز الخامل:
- أ- الطاقة الحرارية لأي غاز موجود قابل للاحتراق.
- ب- الحرارة الملموسة للغازات.
- الحرارة الملموسة المنقولة إلى مياه التبريد.
- الحرارة الملموسة المختزنة في منشأ الفرن إذا بدء الفرن من حالات باردة.

- الحرارة الملموسة في معدة النقل مثل الصواني، الملاسل، ألواح التحميل...الخ المستخدمة في شحن وتفريغ الفرن.
- الحرارة الكلية في أي متبقي في الحريق:
أ- الحرارة الكامنة في الكربون الذي لم يحترق في الرماد، السناج، القار...الخ.
- ب- الحرارة الملموسة في الرماد وفي التكتلات (الكلكر).
- ج- الحرارة الكلية في الخبث المنصهر.
- الفقد الإشعائي في الحرارة:
أ- التوصيل خلال المجرمة.
- ب- التوصيل خلال الحوائط والأسقف، المكافئ إلى الانعكاس والإشعاع من السطح الخارجي للفرن.
- الرقم الغير محسوب بحساب الفرق بين بنود المدخلات الكلي ناقص بنود المخرجات، يجب أن يقل عن ٥% من بنود الكلية للمدخلات.

بنود الحرارة المطلوبة/ المستخدمة في الميزان الحراري:

الحرارة الملموسة: (Sensible Heat)

الحرارة الملموسة هي الحرارة التي تعلو درجة حرارة (القياس) (datum) الموجودة في المادة المأخوذة من العملية وتساوي كمية متوسط ارتفاع درجة الحرارة أعلى من القياس.

الحرارة النوعية: (Specific Heat)

الحرارة النوعية هي الحرارة الكامنة في وحدة الكتلة/ الحجم للمادة الصلبة، السائلة، الغازية عند ارتفاع درجة حرارتها بدرجة مئوية واحدة. خلال مجال كبير من درجة الحرارة، القيمة المتوسطة يمكن استخدامها، ذلك لأن الحرارة النوعية هي بدلالة درجة الحرارة.

الحرارة الكامنة: (Latent Heat)

الحرارة الكامنة هي كمية الحرارة التي تنطلق أو تمتص عند درجة حرارة ثابتة عند تغير المجال، مثال: من الحالة الصلبة إلى السائلة، ومن السائلة إلى الغازية أو من أحد حالات التبخر إلى الأخرى والعكس.

الحرارة (الطاقة) الكلية:

وهذه مجموع الطاقة (الحرارة) المحسوسة والمختزنة (الكامنة) عادة على أساس وحدة الوزن. الطاقة الكلية للبخر مثلاً تشمل:

- الحرارة المحسوسة من صفر درجة مئوية إلى درجة حرارة الغليان.
- الحرارة الكامنة عند نقطة الغليان.
- الحرارة المحسوسة للبخر بعد نقطة الغليان.

الجهود الحرارية (القدرة الحرارية): (Potential Heat)

الجهود الحرارية هو القيمة الحرارية للوقود أو المادة التي لم تحترق التي يمكن أن تنطلق عند الحرق وتساوي الكمية \times القيمة الحرارية (الكلية/ الصافية).

حرارة التفاعل: (Heat of Reaction)

حرارة التفاعل هي الحرارة لأي تفاعل كيميائي (أو الطاقة الكلية إذا كان أكثر من تفاعل) يحدث في العملية. حرارات التفاعل يمكن تقديرها طبقاً لكميات مواد التفاعل التي سوف تعطي الوزن الجزيئي بالآتي: كجرام/ جرامات/ أرتال من المنتج الرئيسي. يجب استخدام نظام ثابت للوحدات. التفاعلات القياسية تقدر عند 25°C ويمكن تطويرها بقانون هيس (Hess law) إلى حالات أخرى.

المكافئ الحراري: (Heat Equivalent)

المكافئ الحراري للبخر، الطاقة الكهربائية، الهواء المضغوط أو أي مصدر ميكانيكي آخر يتم توفيره للمراوح/ الطلمبات لتدوير، لتغذية أو لسحب المواد وللمعدات الثانوية الأخرى يجب أن يكون ضمن الميزان الحراري.

الفترة الزمنية للميزان الحراري: (Period of Heat Balance)

لعمل الميزان الحراري المكافئ، فإن ظروف نهاية فترة عمل الملاحظة يجب أن تكون نفسها لتلك عند البداية ولكن ليست طويلة جدا بحيث يؤخذ في الحساب الأداء لمدة طويلة مثال بسبب بري حوائط الفرن.

الأسلوب العادي هو كالاتي:

١. العمليات الدورية (Cyclic):

في العمليات التي تحدث دوريا، تبدأ الملاحظات وتنتهي عند نقاط مقابلة في الدورة. مثال من صنبور إلى الصنبور التالي.

٢. العمليات بالدفععة الواحدة (Patch):

الملاحظات خلال عملية الدفععة الواحدة أو العمليات.

٣. العمليات المستمرة:

الملاحظة بعد أن تستقر الظروف وتستمر لمدة طويلة كافية حيث تهمل التغيرات الصغيرة. الظروف يجب المحافظة على استمرارها عند عمل الملاحظة.

القياسات في الميزان الحراري:

القياسات المباشرة للكتلة يجب عملها كلما أمكن ذلك. التغير الصافي في الشحنة يتم تقديره. أحجام الزيت، البخار، غازات الهواء. الخ يتم قياسها معا بالضغط المناسب ودرجة الحرارة المناسبة لكل المواد الداخلة والمواد الخارجة ويتم التسجيل أثناء فترة الملاحظة. البيانات الطبيعية تكون مطلوبة لحساب الجهد المنفرد (individual) الحرارة المحسوسة، الحرارة الكامنة. التحليل الكيميائي للوقود، مواد السفاعل الأخرى والغازات العادمة تكون كلها مطلوبة مع القيمة الحرارية للوقود. حرارة التفاعلات الكيميائية متاحة في الجداول، كما يمكن تعيين القيمة الحرارية للوقود مباشرة.

حساب الميزان الحراري للمبادل الحراري:

مثال:

فرن تجديد يستهلك هواء بمعدل ١٢٧٥٠ متر مكعب/ الساعة عند درجة حرارة دخول ثابتة ٢٠ °م. يدخل الهواء المجدد المحتوي على ٥٠ طن من الماء الحراري بمتوسط حرارة نوعية ٠,٢٤٧ كيلو سعر حراري/ كجرام ٥ م، خلال نصف دورة ذات ٢٠ دقيقة وخلال نصف الدورة الآخر ١٤٢٠٠ م^٢/ الساعة من دخول الغاز العادم عند درجة حرارة ثابتة ١٢٢٠ °م ويتركه عند متوسط درجة حرارة ٧٠٠ °م . احسب درجة الحرارة المتوسطة للهواء الذي يترك المجدد وكذلك متوسط الارتفاع في درجة حرارة شبكة الطوب أثناء دورة التسخين. بفرض أن ٩٥% من الحرارة المتاحة تصل إلى المجدد.

متوسط الحرارة النوعية للهواء والغازات العادمة هو ٠,٣١٧ ، ٠,٢٣٢ كيلو سعر حراري/ م^٣ على التوالي.

الحل:

الحرارة المتاحة في المجدد

$$0,95 \times \text{الحجم} \times \text{الحرارة النوعية} \times \text{الخفض في درجة الحرارة} = \\ 0,95 \times 14200 \times 0,317 \times (20 - 1220) = 5374416 \text{ كيلو سعر حراري/} \\ \text{الساعة}$$

$$\text{الحرارة العادمة المفقودة} = 0,332 \times 14200 \times (20 - 700) = \\ = 3205792 \text{ كيلو سعر حراري/ الساعة}$$

الحرارة التي تم تخزينها في المجدد

$$= 5374416 - 3205792 = \text{الكتلة} \times \text{الحرارة النوعية} \times \text{الارتفاع}$$

في درجة الحرارة أو

$$2168624 = 0,247 \times 50000 \times \text{الارتفاع في درجة حرارة الطوب الحراري}$$

لذلك

$$\text{الارتفاع في درجة الحرارة} = \frac{2168624}{50000 \times 0,247} = 175,6^\circ \text{م}$$

$$\text{الحرارة المخزنة في المولد} = 3205792 - 5374416 =$$

$$= \text{الحرارة التي خرجت بالهواء}$$

أو

$$2168624 = (20 - T) \times 0,317 \times 12750$$

حيث

$$T = \text{درجة حرارة الهواء الخارج من المجدد}$$

$$556,5 = 20 + \frac{2168624}{12750 \times 0,317} = T$$

لذلك، فإن درجة حرارة الهواء الخارج تكون $556,5^\circ \text{م}$ بينما الارتفاع في درجة حرارة الطوب الحراري أثناء دورة الحرق $= 175,6^\circ \text{م}$.

الباب الثالث

3

الحراريات Refractories

•• محتويات الباب :

الفصل الأول : الحراريات Refractories

الفصل الثاني : اختبارات الحراريات

Testing of Refractories

الفصل الثالث : الحراريات العازلة

Insulating Refractories

الفصل الرابع : الحراريات الخاصة

Special Refractories

الفصل الخامس : المونة الأسمنتية الحرارية الكتل

القابلة للانضغاط والسبك

الفصل الأول

1

الحراريات Refractories

١- مقدمة :

الحراريات هي تلك المواد التي تتحمل درجات الحرارة العالية ولا تتصهر مثل الطفل الحراري (fireclay)، السيليكا، الكروميت، المجنيزيت (chromite, magnesite).....الخ.

تصنف أنواع المواد الحرارية طبقاً لطبيعتها الكيميائية كالآتي:

نوع المادة الحرارية	أمثلة	ملاحظات
الحراريات الحامضية (المكون الرئيسي هو السيليكا)	الطلح الحراري، السيليكا، الكوارتز، الرمال الحراري (ganister sand)	يجب ملاحظة تجنب التصاقها بالمنتجات الحامضية لتجنب حدوث التفاعلات
الحراريات القاعدية وهذه تتكون من أكسيد قاعدي بدون وجود سيليكا حرة	البوكسيت، الجير المطفي، المجانيزيت (magnesite)، الدولوميت، الألومينا، الزركونيا. لا يستخدم الجير المطفي (lime) كمادة حرارية نظراً لشرائه للماء.	يجب ملاحظة تجنب التصاقها بالمنتجات الحامضية لتجنب حدوث التفاعلات
الحراريات المتعادلة	الكروميت، الكربون الجرافيتي المقاوم	يمكن استخدامه

نوع المادة الحرارية	أمثلة	ملاحظات
	للحرارة، الكريد، kyanite، mullite	بالاتصال مع المنتجات الحامضية أو القلوية

كذلك يمكن تقسيم الحرارية على أساس المقاومة الحرارية كالآتي:

نوع الحرارية	قيمة القمع الحراري (قمع سيجر)	القدرة الحرارية/ درجة حرارة الانصهار °م
الحراريات ذات القدرة المنخفضة	٢٨ - ١٩	١٦٣٠ - ١٥٢٠
الحراريات ذات القدرة المتوسطة	٣٠ - ٢٨	١٦٧٠ - ١٦٣٠
الحراريات ذات القدرة العالية	٣٣ - ٣٠	١٧٣٠ - ١٦٧
الحراريات الفائقة القدرة	أكثر من ٣٣	أكثر من ١٧٣٠

ملحوظة: قيمة القمع الحراري (قمع سيجر) (Siger cone) لقياس درجات الحرارة أعلى من ٥٠٠ °م.

٢- الخواص:

الخواص الهامة للحراريات هي مقاومة درجة الحرارة العالية، الأحمال الثقيلة، المواد المساعدة في انخفاض درجة حرارة الانصهار (fluxes)، السوائل العدوانية مثل الخبث (slag)، الصدمات الحرارية الناتجة عن التغير السريع في درجات الحرارة والذي يسمى (spalling resistance) أي مقاومة التقشر...الخ. الخواص الأخرى هي القوة، الكثافة، التوصيل الحراري والكهربي...الخ وهي:

١- المسامية ونفاذية الخبث (Porosity and Slag Permeability):

زيادة المسامية للحراريات تزيد من حساسيتها للتفاعل والعدوانية الكيميائية بفعل الغازات والخبث المنصهر...الخ. عند خفض المسامية، فإن القوة تزداد والتوصيل الحراري يزداد ولكن مقاومة الصدمات الحرارية (spalling resistance) تنخفض بسبب انخفاض معظم الفراغ لامتصاص التمدد والانكماش.

ب- المقاومة الحرارية أو نقطة الانصهار (refractoriness or Fusion point)

وهي درجة الحرارة التي عندها تنصهر المادة الحرارية. يجب أن تكون أعلى من درجة حرارة الاستخدام للحراريات. نقطة الانصهار تنخفض عندما تكون المادة الحرارية تحت أحمال (refractories under load).

ج- القوة Strength

القوة هي مقاومة الحرارية لأحمال الضغط ولإجهادات الشد والقص. تعتبر المقاومة الحرارية تحت الأحمال هامة ذلك لأن بعض الحراريات تنهار عند درجات حرارة منخفضة عند تعرضها للأحمال. في الأفران العالية يجب على الحراريات أن تتحمل الحمل العالي، لذلك فإن القوة تحت التأثير المشترك للقوة والحرارة تعتبر هامة.

د- الوزن النوعي (Specific Gravity)

يجب أن يكون الوزن النوعي منخفضا للحصول على أكبر عدد من الطوبيات لوحدة الوزن. كذلك فإن الطوب الخفيف في الجزء السفلي من المنشأ العالي لا تكون معرضة للأحمال الثقيلة. التكلفة السعيرية للطوب بالوزن النوعي العالي أكثر من ذلك بالوزن النوعي المنخفض (يفرض أن سعر الخام هو نفسه).

هـ- التقشف والتشقق (Spalling)

وهو تقشف الحراريات بسبب التمدد الغير متجانس بسبب الحرارة وذلك عند التعرض للتسخين السريع والتبريد. لخفض التشقق فإن الحراريات يجب حرقها جيدا ومساميتها يجب أن تزداد.

التوصيل الحراري:

كتل الأفران العادية يجب أن يكون لها توصيل حراري منخفض ولكن الحراريات المستخدمة في أفران الكوك، المولدات، الأفران اللاقحة (أفران الإحماء الخارجي muffle furnaces) يجب أن يكون لها توصيل حراري عالي. يزداد التوصيل الحراري مع انخفاض المسامية في الطوب الحراري أي عند انخفاض الهواء المحبوز

في الحرارية. طوب العزل الحراري (له توصيل حراري منخفض) تظل عند درجة الحرارة العالية ولذلك يكون عمر استخدامها قصير.

التوصيل الكهربائي:

في الأفران الكهربائية يجب أن يكون التوصيل الكهربائي للمادة الحرارية منخفض. عدا، الجرافيت فكل الحرارية الأخرى ذات توصيل كهربائي رديء. المقاومة الكهربائية للحراريات تنخفض بسرعة مع ارتفاع درجة الحرارة.

التركيب الكيميائي:

يجب أن يكون التركيب الكيميائي للمادة الحرارية أن المجالات المحيطة لا تتفاعل مع الحرارية وتحدث بها تآكل. يجب عدم استخدام الحرارية الحامضية في أفران تسخين مادة قاعدية وإلا فإن الطوب سوف يتفاعل مع مكونات الفرن ويحدث به تآكل بما يقلل من عمره الافتراضي.

٢- الطرق العامة لصناعة الحرارية:

صناعة الحرارية تتكون من العمليات الآتية:

الطحن Grinding

يتم طحن المواد الخام للوصول إلى حجم الحبيبات المناسب. يجب أن النسبة بين الحبيبات الخشنة والناعمة، هذه النسبة يتم المحافظة عليها ٥٥ : ٤٥ . المعدات المستخدمة لهذا الغرض ذات أنواع مختلفة من الكسارات، الطواحين، معدات الطحن بالطرق، الطحن بكرات الطحن، مناخذ الاهتزاز، المصافي....الخ.

المعالجة المسبقة:

المعالجة المسبقة الرئيسية للحراريات الخام هو الحرق/ التخميص عند درجة حرارة عالية، لمدة زمنية طويلة التي تحقق التحول الكامل للمادة وبالتالي ثباتها. مكونات المادة الحرارية المشطبة المنتجة بالتفاعل بين الحبيبات الصلبة للمواد الخام نادرا ما تكون في حالة اتزان تام ذلك لأنه نادرا ما يكون صهر وسبك هذه المواد

الحراية مجديا. السليكا الطبيعية تحتوي أساسا الكوارتز والذي لا يكون مستقرا عند درجات الحرارة العالية وتحدث لها تحولات كبيرة في الحجم. الكوارتز (الشكل الثابت للسليكا حتى ٨٧٠ °م يتحول إلى tridy mite) عند التسخين لمدة طويلة عند درجة الحرارة هذه أي ٨٧٠ °م. الحرق لمدة زمنية أقل عند درجة حرارة ما بين ٨٧٠ ° و ١٤٧٠ °م ينتج عنه تحول الكوارتز إلى (tridy mite). وعند التسخين أعلى من ١٤٧٠ °م فإن هاذ يتحول إلى (cristobalite). تحول الكوارتز إلى (tridy mite) ينتج عنه ١٦% زيادة في الحجم بينما تحول (tridy mite) إلى (cristobalite) يسبب حدوث نقص وانكماش قليل في الحجم. لذلك فإن السليكا الخام تتمدد كثيرا عند التسخين إلى درجات الحرارة العالية ويصبح الثبات المسبق للسليكا ضروري.

وبالمثل، الطفل الحراي الذي يتكون من المواد المعدنية المختلفة سيليكات الألومنيوم المائية (hydrous alumino-silicate)، ينفقت إلى مكونات عديدة عند التسخين. وهذه المكونات تميل إلى تكوين الموليت الثابت ($3Al_2O_3 \cdot 25H_2O$). تكون الموليت يبدأ عند ١٠٠٠ °م ويزداد سريعا مع زيادة درجة الحرارة. القوة العالية عند درجة الحرارة المرتفعة، ومقاومة التفاعل مع الخبث والخواص المفيدة الأخرى للطوب الحراي تتوقف على تكون الموليت وخواص الأربطة الزجاجية (glassy bonds). حتى أن عوامل التعرية لخليط الطفل الحراي تزيد من قوة مرونته (plasticity).

الماجينزيت (magnesite) يتم حرقه جيدا للتخلص من CO_2 وتحويله إلى الماجينزيا البللورية الثابتة (MgO) المعروفة باسم (periclase) وتتضمن أدنى انكماش في الأشكال الحراية عند الحرق.

الدولوميت (dolomite) الذي يتكون أساسا من ($CaCO_3 + Mg CO_3$) يتم حرقه جيدا أكسيد الكالسيوم، periclase (MgO). الدولوميت كما هو له ميل للتميؤ وهو غير مناسب كحرايات ولذا يتم عدم تنشيطه بتحويله إلى السيليكات أو إلى مركبات أخرى. استعداد الدولوميت للتميؤ المحروق يمكن إبعاده بتحويل الكالسيوم إلى داي كالسيوم سيليكيت أو تراي كالسيوم سيليكيت في وجود Fe_2O_3 وسوير بنتين (super pentine)

بالتتالي. وجود Fe_2O_3 للتحويل إلى السداي كالسيوم سيليكيت يمنع تكون مركب (Y. dicalcium silicate) والذي ينتج عنه انفجار بسبب الزيادة ١٠% في حجمه عند درجة حرارة التشغيل. التخميص (calcinations) لخليط من الدولوميت، serpentine عند ١٦٠٠ °م ينتج التراي كالسيوم سيليكيت و MgO والذي يكون مادة حرارية جيدة.

الخلط: (Mixing)

المادة الحرارية المطحونة يتم خلطها مع مادة ربط بالطريقة التي تمكن من التوزيع المتساوي للمادة البلاستيكية خلال المخلوط لتسهيل الصب والتشكيل.

عادة يتم الخلط في خلاطة عجن الطفلة (pug mills) للتوزيع المتساوي للحبيبات الدقيقة والخشنة في كل الكتلة. تضاف كمية المياه السابق تقديرها، وكذلك الإضافات ومادة الربط والجروج (كسر المادة الحرارية)، ومواد التثبيت ويتم الخلط الجيد للكتلة لتأكيد الحصول على منتج مكوناته متجانسة وكذلك التوزيع المتجانس للحبيبات الدقيقة والخشنة والمادة البلاستيكية ومادة الربط....الخ. لسهولة التشكيل في القالب وتوفير الخواص المفيدة في الطفل الحراري المحروق. لتأكيد زيادة اللدونة لسهولة التشكيل في القالب، فإن الخليط يظل كما هو لمدة يوم واحد أو أكثر.

الخلط يمكن أن يكون جافاً، أو رطباً أو شبه لدن (Semi-plastic). يستخدم من ١٤ - ٢٠% من الماء في الخلط الرطب والذي يستخدم عادة في حالة التشكيل اليدوي. المخاليط شبه لدنة يكون به نسبة أقل من المياه للوصول على شبه حالة اللدونة، بينما الخليط الجاف يحتوي على خليط قاعدي وخليط طفلة محتوي على أقل من ٥% ماء. نظراً لأن الخلط مع كمية المياه القليلة هذه يكون صعباً، فإنه يستخدم الماء في شكل رشاشات صغيرة للحصول على الخليط الجيد. نظراً للحاجة إلى الضغوط العالية للتشكيل فإن المخاليط الشبه لدنة والجافة يتم ضغطها آلياً. مخاليط الطفلة يتم الحصول عليها كذلك في شكل محاليل غروية (colloidal) مناسبة للتشكيل بالسبك المنزلق (slip casting).

التشكيل أو القولية: (Moulding)

يتم التشكيل ميكانيكيا إما باستخدام الضغط العالي أو يدويا لزيادة الكثافة (بإزالة الهواء) وزيادة القوة لمادة الحراريات. التشكيل الذي يلي الخلط للمواد الحرارية يتم أليا أو يدويا بالضغط والبيثق. التشكيل اليدوي (الناجح مع المخاليط الرطبة) يتم في صناديق خشبية وهو أقل تكلفة عن التشكيل الآلي في حالة التشكيل بالقطعة. ولكن التشكيل الآلي له استخدامات عملية أكثر وأقل في التكلفة في حالة إنتاج أشكال حرارية قياسية. الحرارية المشكلة أليا لها قوة أكبر وكثافة أعلى مقارنة بالتشكيل اليدوي. يمكن استخدام التشكيل الآلي للمخاليط شبه اللدنة باستخدام ضغوط التشكيل متوسطة. يستخدم البيثق (extrusion) عادة للحصول على الأشكال الأولية ذات الأبعاد التقريبية والتي يتم بعد ذلك ضغطها إلى الأشكال الصحيحة. التشكيل الآلي للمخلوط الجاف يتطلب ضغط حوالي ١٠٠٠ كجرام/سم^٢ أو أكثر.

عند ضغوط التشكيل العالية فإن الهواء يحتجز في الحراريات ويسبب الرقائق (laminations). لذلك فإنه يتم إزالة الهواء من الحراريات بالطرق الآتية:

- ضغط المادة ثم السماح بالتشقق، أخيرا إعادة الضغط لقلل المسام.
- توفير حالة التفريغ في النظام خلال فتحات تنفيث في القالب.
- إمرار غاز (مثل غاز البيوتين) خلال القالب لاستبدال الهواء (الغاز يمتص بواسطة الطفلة عند الضغط).

تزداد قوة وكثافة الحراريات مع إزالة الهواء بسبب خفض الترقيق والتشقق. تزداد الكثافة تكون كذلك بسبب التخلص من الهواء ذو الكثافة القليلة عن المادة الحرارية و/أو قفل المسام.

الطريقة المستخدمة في تشكيل الحراريات المفرغة أو ذات الأشكال الخاصة الأخرى هي الصب الزلق (slipcasting) حيث الردغة (colloidal suspension) يتم صبها في قوالب من الجبس التي تمتص الماء وتعمل على ترسيب طبقة طفلة متجانسة على

حوائط القالب. مع ترسيب السمك المطلوب من الطفلة (الذي يعتمد على الزمن الخاص بعملية الترسيب)، فإن الخليط الزائد في الردغة يتم صبه خارج القالب بما ينتج عنه حراريات مفرغة ذات كتنورات غير منتظمة داخلية.

ضغط المسحوق يستخدم لتشكيل الحراريات للحصول على الدمج الجاف أو خليط المسحوق الحراري المرطب قليلا في قوالب معدنية باستخدام الضغط العالي الكافي لإنتاج أشكال حرارية كثيفة وقوية. عمليات التشكيل الحديثة المستخدمة في بعض الحراريات تشمل الضغط النشط على الساخن والضغط المتساوي من جميع الجهات (isostatic pressing).

التجفيف: (Drying)

يتم التجفيف بمعدل بطيء لتجنب الفراغات والانكماش العالي. تجفيف الحراريات التي تم تشكيلها يزيد قوتها الأولية بإزالة الرطوبة وبذا تكون آمنة لعمليات التداول. يتم التجفيف عادة في الظل وليس بالتعرض المباشر لأشعة الشمس على مساحة كبيرة من أرض التجفيف. تستخدم كذلك الأراضي التي يتم تسخينها بالمخلفات الحرارية من الأفران عند وضع الحراريات في صفوف مفتوحة. يتم التجفيف في مجموعة ظروف سابق تحديدها (من الحرارة والرطوبة) مع معدل التجفيف عند أدناه لتجنب التشققات وتكون الشروخ.

للتجفيف السريع للحراريات ذات الشكل والحجم الثابت، تستخدم الأفران النفقية (tunnel kilns)، حيث الحراريات الخام يتم رصها في عربات نقل منخفضة (bogies) أو على السيور المتحركة خلال النفق في اتجاه معاكس لتدفق الهواء الساخن. في هذه الظروف فإن ظروف التجفيف لا يلزم تغييرها (حيث أن شكل وأحجام الحراريات ثابت) لتأكيد التجفيف بدون تلف الحرارية عند حدوث الانكماش العالي. تكون الشقوق الذي يحدث عند زيادة معدل التجفيف.

تستخدم المجففات ذات الرطوبة المحكمة لتجفيف الحراريات ذات الأشكال المعقدة. معدل التجفيف للطوب الحراري يجب أن يكون منخفض جدا لتجنب حدوث

التشققات والتي يكون حدوث احتمالاتها أقصاه عند التجفيف.

الحرق (Burning)

يتم حرق الطوب في الفرن (فرن نفقي - tunnel kiln) أو (فرن السحب السفلي أو التسيار الهابط - downdraft) لإزالة ماء التميؤ، التزجيج (vitrification) والحصول على شكل ثابت. يتم انكماش في الحجم أثناء الحرق يصل إلى ٣٠%. حرق الحراريات السذي يتبع تطوير تسهيلات تجفيفها للشكل المعدني الثابت وقوة الكسر العالية للمنتجات النهائية.

درجة الحرق لطوب السيليكا يوضح طبقا لوزنها النوعي. الوزن النوعي العالي ٢,٥ يوضح وجود كمية كبيرة من الكوارتز الذي لم يتحول حيث الوزن النوعي ٢,٣ إلى ٢,١٧٧ يوضح الحرق الجيد وتحول الكوارتز إلى الكريستوباليت (cristobalite) م/ أو تراديميت (tridymite).

التسخين السريع لحراريات السيليكا أعلى من درجة حرارة التحول يمكن أن ينتج عنه تقشرها وتشققها بسبب الإجهادات الداخلية بسبب التغير الكبير في الحجم في الحراريات. يمكن منعه باتباع التسخين الحذر للبرنامج حتى في حالة الاستخدام النهائي للحراريات المحروقة في الأفران حيث يحدث بعض التحولات ثانيا إلى الكوارتز عند تبريدها. طوب السيليكا يتم وضعه في الفرن بفواصل صغيرة لمقابلة متطلبات تمدده أثناء الحرق بينما الطوب من الطفل الحراري يمكن التصاقه جيدا (نظرا لأنه ينكمش من الحرق) للحصول على أقصى إنتاج.

حرق الطوب يتم إما في أفران التيار الساخن السفلي (down draught)، أو من النوع على دفعات (batch) أو الأفران النفقية. أفران من النوع على دفعات حيث يتم الحرق هي مستهلكة للوقت بسبب عمل ثلاث عمليات وهي تبينة الطوب والحرق والتبريد. صعوبة الحصول على درجة حرارة متجانسة خلال فرق الدفعة الواحدة (كما في حالة التسخين بالفحم أو الكوك) ينتج عنه منتج محروق جيدا أو بالحرق الزائد عند

منطقة القاع وطوب غير تام الحرق من المنطقة الأبرد. ولكن في الأفران الحديثة (التي تنقسم إلى مختلف الأجزاء)، يتم التسخين في غرفة واحدة وعند درجة حرارة واحدة فقط بعد ذلك يتحرك اللهب إلى الغرفة التالية. كمية هواء الحرق السابق تحديدها يتم تسخينها مسبقا خلال بعض حجرات التبريد للفرن والتي تجعل كذلك معدل التبريد للحرايات المحروقة وبذا ينخفض وقت الإنتاج. وبالمثل، الغازات العادمة من غرف الحرق يتم تمريرها خلال غرف الفرن المعبأة جيدا بالطوب وذلك للتسخين المسبق الحرايات المجففة والذي يؤدي كذلك إلى المحافظة على طاقة الوقود.

ولكن للإنتاج الكمي للطوب الحراي فإن الأفران النفقية المستمرة هي الأكثر مناسبة حيث الحرايات الجافة يتم تعبئتها عند أحد النهايات والمنتج المحروق يتم سحبه من النهاية الثانية عند درجة حرارة الغرفة تقريبا. يتم إكمال الحرق في المنطقة المتوسطة للفرن الأكثر سخونة حيث الهواء الثانوي يدخل خلال نهاية السحب ويتم تسخينه المسبق حيث يعمل على تبريد الطوب المحروق في طريق خروجه من الفرن. هواء الحرق السابق تسخينه يستخدم في حرق الوقود السائل (بعض الأفران ما زالت تستخدم الفحم/ الكوك كوقود) في المنطقة الوسطى الأكثر سخونة. التسخين المسبق للهواء، بالإضافة إلى زيادة درجة الحرارة في منطقة الحرق يقلل كذلك من استهلاك الوقود. الغازات العادمة الساخنة عند تحركها في اتجاه نهاية التعبئة للفرن النفقي تفقد بعض حرارتها للحرايات الباردة وتسخينها مع تحرك هذه الحرايات في اتجاه منطقة الحرق والذي هي أسخن منطقة.

درجة حرارة الحرق لبعض أنواع الأفران كما في الجدول التالي:

جدول (٣/١) درجة حرارة الحرق التقليدية للحرايات

نوع الحرايات	درجة حرارة الحرق °م
الطوب الحراي	١٢٥٠ - ١٤٠٠
الطوب عالي الألومينا	١٤٥٠ - ١٥٥٠
طوب السيليكات	١٤٥٠ - ١٥١٠

نوع الحرارية	درجة حرارة الحرق °م
طوب الكروم	١٦٥٠ - ١٤٥٠
طوب الماغنيزيت	١٦٥٠ - ١٤٥٠
الطوب القاعدة بالربط المباشر (Direct Bonded Basic Bricks)	١٧٦٠ - ١٦٥٠
كربيد السيليكون (SiC)	١٥١٠ - ١٣٧٠

جدول (٣/٢) المكونات الرئيسية لأنواع الطوب الحراري

المكونات الرئيسية	الطوب الحراري	الطوب الحراري الألومني	الطوب شبيه السيليكا	طوب السيليمانيت	طوب الماغنيزيت	طوب الكروم
SiO ₂	٧٠ - ٥٠	٥٥ - ٥٠	٩٥ - ٩٤	٣٥ - ٢٥	٥ - ١,٥	١٠ - ٣
Al ₂ O ₃	٣٨ - ٢٥	٤٥ - ٣٨	٢ - ٠,٥	٦٥ - ٥٥	٤ - ١	٢٥ - ١٠
Fe ₂ O ₃	٢ - ٥	٤ - ٢	١,٥ ٠,٥	١,٥ - ٠,٥	٨ - ٢	٢٥ - ١٢
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	٤٥ - ٣٥
MgO	١ - ٠,٥	١ - ٠,٥	١ - ٠,٥	١ - ٠,٥	٩٢ - ٨٤	٣٥ - ١٢
CaO	١ - ٠,٥	١ - ٠,٥	٢,٢٥ - ٢	١ - ٠,٥	٥ - ٢	٢

نسبة TiO₂ والقلويات (K₂O + Na₂O) في الطوب الحراري السابق قد تتغير ما بين آثار قليلة إلى ٢%.

متطلبات الحرارية الجيدة لمهمة معينة:

- يجب أن تكون قادرة على تحمل درجات الحرارة المحتمل أن تتعرض لها.
- يجب ألا تتآكل بالخبث الناتج في الفرن والذي تتعرض له الحرارية.
- يجب أن تقاوم التقطيع بفعل الغازات العادمة واللهب.
- الانكماش والتمدد للحراريات يجب ألا يكون مفاجئاً بل يجب أن يكون منتظماً.
- يجب أن تقاوم الضغط الذي تتعرض له.
- يجب أن تكون قادرة على الاحتفاظ بالحرارة.
- يجب أن تكون قادرة على تحمل التغيرات المفاجئة في درجات الحرارة.

اختيار الحراريات:

اختيار الحراريات لأي استخدامات معينة يجب أن يراعى الحصول على أقصى كفاءة لمعدة الفرن أو الغلاية ويتوقف على خواص معينة للحراريات. وكذلك فإن اختيار مادة الحراريات لاستخدام معين يتحدد بنوع الفرن وحدود التسخين والظروف السائدة....الخ، الجو الغازي، وجود الغازات ونوع العبوة من المعدن....الخ. لذلك فإن درجة الحرارة ليست هي المعيار الوحيد في اختيار الحراريات.

يجب أن يكون لدى مصمم أي فرن فكرة واضحة عن ظروف التشغيل التي يجب أن تواجهها الحراريات. صناع الأفران والمستخدمين يجب أن يراعوا النقاط الآتية قبل اختيار مادة الحراريات:

- المساحة المتاحة للاستخدام.
- درجات حرارة التشغيل.
- حدود البري والتصادم.
- الحمل الإنشائي للفرن.
- الإجهاد بسبب التدرج في درجات الحرارة في الفرن والتغيرات في درجات الحرارة.
- التوافق الكيماوي مع بيئة الفرن.
- الانتقال الحراري والحفاظ على الطاقة الحرارية.
- اعتبارات اقتصادية.

من الضروري تقدير الظروف السابقة. تقييم الخواص المطلوبة يوفر الخطوط الإرشادية لاختيار مادة الحراريات المناسبة. صانع الفرن أو المستخدم يجب أن يراعى المحافظة على الطاقة. يمكن توفير الوقود إما بالعزل أو بسرعة العمل. وهذا يحقق تكاليف منخفضة للطاقة لكل طن من المنتج.

المغنسيوم، سيليكات الحديد...الخ. أكثر العناصر ضررا هي العناصر القلوية القاعدية التي تكون السيليكات المزدوجة ذات درجة حرارة انصهار منخفضة. مكونات ودرجة حرارة انصهار لبعض الطفل الحراري في الجدول الآتي

أنواع الطفل			المكونات %
صلب - صوان	شبه لدن	لدن	
٢٩ - ٣٨	١٧ - ٢٨	٢٦ - ٣٨	Al_2O_3
٤٨ - ٧٥	٥٦ - ٧٤	٤٨ - ٦١	SiO_2
٠.٦ - ١.٦	٠.٦ - ٢	٠.٦ - ٢.٥	Fe_2O_3
٠.٥ - ٢	٠.٨ - ١.٥	صفر - ١.٨	TiO_2
صفر - ٠.٦	صفر - ٢.٧٥	صفر - ١.٣	CaO
أقل من ٠.٥	--	٠.٩ - ١.٥	قلويات
١٦٥٠ - ١٧٥٠	١٦٠٠ - ١٧٠٠	١٦٢٥ - ١٧٢٥	درجة حرارة الانصهار °م

الطفلة التي يتم إنتاجها من المنجم يتم تركها في الهواء الطلق حيث يحدث تآكل للمادة العضوية الموجودة فيها بسبب الحرارة والبرودة والظروف المناخية. وهذا ينتج عنه زيادة في لدونتها بالإضافة إلى إنتاج بعض الأحماض العضوية. يتم التكسير والطحن في كسارات لفاقة (gyratory crushers) ، وفي الرحى الحدية التي تدور حباتها الأسطوانية على حدها في حوض دائري (edge runners).

الطفل الحراري يمكن أن يعلق به الماء ميكانيكيا بالإضافة إلى الماء العالق كيمائيا. أثناء الحرق، وبسبب التخلص من كل هذا الماء وتأثير انخفاض درجة حرارة الانصهار لوجود الملوثات، فإن المنتج ينكمش جدا ويصبح خارج الشكل والحجم. للتغلب على هذه الصعوبة، يتم خلط الطفل الحراري مع مواد مثل السيليكا التي تتمدد و/أو كمية كبيرة من المواد التي لا تنكمش. هذه المادة الأخيرة تسمى (grog) وهي

كسر الفخار. كسر الفخار (الجروج) هو طفل حراري سبق تسخينه إلى حوالي ١٣٠٠ °م بحيث لا يحدث أي انكماش آخر أو الغير مستخدم. تضاف كمية قليلة من الطفل اللدن لتسهيل التشكيل. يتم عمل الخليط بطحن الطفل الحراري الخام والجروج والطفل اللدن مع الماء. توجد طرق عديدة لإعطاء الشكل النهائي للمخلوط. في الجو البارد والأكثر رطوبة يتم التجفيف في مجففات. إضافة الجروج إلى الطفل الحراري كعنصر مضاد للانكماش في شكل حبيبات زاوية ذات أحجام مختلفة لتوفير أفضل تماسك للحبيبات. الميزة الرئيسية لإضافة الجروج للطفلة هي:

- خفض الانكماش مع التسخين.
- زيادة القوة للحراريات بعد الحرق.
- مقاومة عالية للتشقق.
- زيادة الوزن النوعي وانخفاض المسامية.
- زيادة معدل الإنتاج بسبب ضرورة انخفاض الماء المضاف للحصول على لدونة قابلة للتشكيل وزمن أقل لتجفيف الحراريات الخام. تتراوح نسبة إضافة الجروج ما بين ٢٠ إلى ٩٠% في خليط الطفلة طبقاً لخواص الطفل الخام والخواص المطلوبة للمنتجات النهائية.
- زيادة نسبة الجروج تحتم استخدام طفلة عالية اللدونة لتوفير الربط المناسب. الحراريات العادية من الطفل الحراري تحتوي على الجروج بنسبة ٢٠ - ٤٠%.
- استخدام نسبة أعلى من الجروج ينتج عنه استخدام في درجة حرارة أعلى وتحسين نوعية المنتج النهائي. الطفل الحراري بنسبة عالية من الجروج قد يحتوي على الجروج حتى نسبة ٩٠%. اختلاف حجم المنتج النهائي يكون بسبب الانكماش العالي الذي يحدث مع التسخين أثناء التجفيف والحرق.
- يمكن تحسين نوعية الجروج باستخدام:
- الانتشار الدقيق والتطبيع المتقن لرباط الطفل عالي اللدونة لتأكيد التوزيع الجيد والربط الجيد بطبقة رقيقة من الطفل ما أمكن.

- الكثافة العالية لجسيمات المادة المحمصة لتحسين قوة وكفاءة المنتج.
- التدرج المناسب للمواد الخام في المخلوط لتأكيد أعلى كثافة دمج ويقلل استخدام الطفل اللدن للربط.
- تأكيد الخلط الجيد وتجانس الخواص في المنتج النهائي بالتغذية المناسبة لمختلف الخامات في المخلوط.

يتم خلط الطفل الحراري الذي تم طحنه إلى قطع صغيرة مع الجروج الذي يتم إعداده مع الرابط من الطفل أو البواركس المحمص، في حالة الضروري في الشكل الجاف أو الرطب. في الخلط الرطب، يتم خلط المواد بالماء في مطحنة الطفلة أو العمومية (Pug Mill or Pan Mill). يتم سقي خليط المواد في الماء لمدة ٣٠ - ٦٠ ساعة أو أكثر قبل نقلها على المطحنة ليتمكن أن تمتص الطفلة الماء والتوزيع المتجانس للكتلة. الخليط بعد الخلط يمكن أن يترك لينضج لعدة أيام في سرداب وقبو أو مطمورة باردة وذلك قبل التشكيل لزيادة اللدونة. تشكيل الطوب يتم إما بالتشكيل اليدوي، الضغط الهوائي، الضغط الميكانيكي. المحتوى من الماء في التشكيل اليدوي والتشكيل الميكانيكي للمخلوط هو من ٧ إلى ٩ % ، ٤ - ٧ % على التوالي. يلزم زيادة ضغط التشكيل للمخاليط ذات المحتوى المنخفض من الرطوبة بينما زيادة المحتوى من الرطوبة تزيد من احتمال الانهيار للمنتج عند خروج المنتج من القالب. الطوب الحراري بالتشكيل اليدوي يكون أقل كثافة مقارنة بالتشكيل الميكانيكي كما أنه لا يكون بالأبعاد المناسبة. التشكيل بالماكينة يزيد من معدل الإنتاج. معدات الضغط الميكانيكي يمكن أن تكون المنضدة الدوارة (rotating table) لولب الاحتكاك (friction screw)، الرجرجة والهز الآلي، الهيدروليكي، أو النوع المفصلي (toggle). طرق التشكيل الأخرى هي البثق، القطع بالسلك وإعادة الضغط. أشكال خاصة مثل الإطارات والأغلفة... الخ يتم عملها بالبثق ثم إعادة الضغط. الخليط الحراري المشكل بالبثق يحتاج إلى ١٥ - ٢٠ % رطوبة في الخليط، لذلك فإن الأشكال التي يتم بثقها تتطلب عناية خاصة أثناء التجفيف لتجنب حدوث تشققات وعيوب أخرى. الضغط اللازم

لحززون الاحتكاك، والضغط المفصلي وكذلك الهيدروليكي لإنتاج أشكال معقدة (لها حجم متجانس، بناء متجانس وتحسن في قوة الانضغاط) باستخدام خليط يحتوي على ٥ - ٧% رطوبة هو من ٣٠٠ - ٨٠٠ كجرام/سم^٣.

زيادة كمية المواد الدقيقة والرطوبة تقلل من تأثير عملية التخلص من الهواء. عملية الضغط للطوب ينتج عنها مسامية عالية وانخفاض قوة الطوب بينما الضغط الزائد قد يسبب تكون شقوق في الطوب. القوالب والفرم المستخدمة في تشكيل الطوب الحراري هي أكبر حجما قليلا عن الشكل النهائي للحراريات حيث أنها تتكشع مع التسخين والحرق.

الطوب بعد التشكيل يتم تجفيفه في الظل أو في حجرات جيدة التهوية. تستخدم الأرضية التي يتم تسخينها بالبخار للتجفيف النهائي للطوب الذي يتم تشكيله يدويا أو بالبيثق بعد ١ - ٤ يوم من التجفيف الطبيعي. يتم التجفيف كذلك في المجففات النفقية المستمرة حيث العربات المحملة بالطوب الذي تم تشكيله تدفع بمعدل ثابت، والهواء الساخن عند ١٥٠ - ٢٥٠ °م يدفع من نهاية السحب للمنتج الذي يترك المجفف عند ٦٠ - ٨٠ °م عن طرف النهاية للسحب. الرطوبة المفقودة من الطوب تلتصق بالهواء الخارجي حيث تزداد الرطوبة عند طرف السحب للمجفف ويحدث تحكم في معدل الجفاف من المراحل الأولية.

المجففات ذات التحكم في الرطوبة التي يتم تسخينها بالغازات العادمة الساخنة تستخدم في التجفيف. طبقا للمكونات، وطريقة التشكيل ونوع وحجم الطوب، فإن إجمالي زمن التجفيف يتراوح من ٢٤ إلى ٢٠٠ ساعة. معدل التجفيف البطيء يؤكد تجانس التجفيف لكل من داخل وخارج الطوب المدمج بينما معدل التبريد السريع يجعل احتمال التشقق للطوب بسبب عدم تساوي وتجانس التجفيف وكذلك لوجود إجهادات شد في الأشكال الحرارية.

يمكن عندئذ حرق الطوب في الفرن. عند درجة الحرارة المنخفضة يمكن التخلص من الماء. عند ٩٨٠ °م يحدث تفاعل منتج للحرارة بسبب تكون مركب

المولليت ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) والسيليكا الزائدة يحدث لها تبلر في شكل (cristoballite). عادة يتم رفع درجة الحرارة إلى 1400°C واستمرارها لعدة ساعات قليلة للحصول على خواص متجانسة. عند استخدام درجات حرارة أعلى، فإن درجة حرارة الحرق يمكن أن تكون 1500°C . يتم عندئذ إيقاف لهب الفرن والسماح بالتبريد البطيء مع القفل. إجمالي الوقت اللازم هو حوالي أسبوع.

الطوب الحراري الذي تم تجفيفه يتم حرقه في أفران مستمرة أو الأفران التي تعمل على دفعات والتي يمكن أن تكون ذات تيار التسخين العلوي أو تيار التسخين السفلي أو تيار التسخين الأفقي. طبقاً لدرجة حرارة الفرن والتغيرات التي تحدث في الحرارية التي جفت، فإن حرق الطوب الحراري ينقسم إلى المراحل الخمس التالية:

- التبخير أو الترطيب.

- تحليل الطفل.

- الأكسدة أو مرحلة الحرق الكلي.

- الصهر الأولي.

- التلدين والتبريد.

في المرحلة الأولى للحرق وهي التبخير، فإن الرطوبة المتبقية في الطوب الجاف يتم طردها عند 120°C والتي تستمر مع ارتفاع درجة حرارة الفرن. هذه المرحلة للتبخير تستمر لمدة حوالي 20 ساعة.

أثناء المرحلة الثانية والتي تستمر كذلك لمدة 20 ساعة (والتي تبدأ عند 350°C و 900°C وحتى 900°C) يحدث تحليل للطفل مع طرد المواد المتطايرة القابلة للاحتراق وأي ماء جزئي متبقي.

في مرحلة الأكسدة أو الحرق الكلي (والتي تستمر من 12 إلى 36 ساعة وترتفع درجة الحرارة حتى 1350°C) حيث انتقال لمختلف المواد المعدنية. عند 950°C يحدث تكون منتج للحرارة للمولليت ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) عندما تبدأ الألومنيا في الاتحاد مع السيليكا. ما بين $1350 - 1380^\circ\text{C}$ يتم إتمام التبلر للمولليت. الطفل

ينكمش وتزداد صلابته لهذا لا يحدث انكماش للحراريات مع أي التسخين تالي أو عند الاستخدام . مرحلة الحرق الرابعة (والتي تصل إلى ١٥٠٠ °م) يصاحبها الصهر الأولى للملوثات حيث تمتلي الفواصل بين الحبيبات الصلبة بنواتج الصهر . بسبب ملء المسام بواسطة الكتلة الزجاجية، فإن مسامية الحراريات منخفض، ويحدث ربط الحبيبات الطفلة والجروج بما ينتج عنه منتج مدمج وصلب. درجة حرارة الصهر تكون أعلى من تلك المفترض أن يستخدم فيها الطوب. يتم سقي الطوب عند درجات حرارة أعلى للحصول على تجانس الخواص.

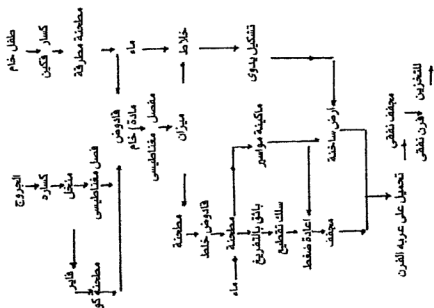
تشمل المرحلة الأخيرة للتلدين والتبريد البطيء جدا للطوب المحروق في الأفران نفسها. في الأفران ذات الدفعات، يتم إطفاء اللهب، وقلل الخانق ومعظم الحرارة تفقد بالإشعاع. هذا التبريد يستغرق نفس الوقت مثل التسخين للطوب إلى درجة حرارة النضج.

تستخدم معدلات الحرق العالية للحراريات ذات المحتوى العالي من الجروج والذي له انكماش منخفض. الحراريات ذات المحتوى العالي من الألومينا تتطلب درجة حرارة حرق مرتفعة (١٥٠٠ - ١٦٨٠ °م) طبقا لنسبة الألومينا. يمكن خفض درجة حرارة الحراريات وهذه تعمل على تماسك حبيبات الحراريات. ولكن مثل هذه الحراريات تنخفض قدرتها الحرارية عند قيم التحميل.

بعد الحرق يتم تشوين الحراريات. يتم التخلص من الطوب الذي تم حرقه أكثر من اللازم والطوب الغير تام الحرق يتم إعادة حرقه.

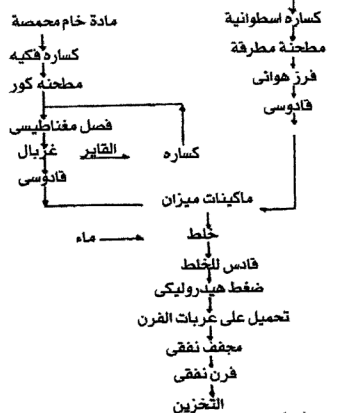
مخطط لصنع الطوب الحراري بالطرق الرطبة اللدنة وبالطرق الجافة موضح في الأشكال (٣/٢) ، (٣/٣).

فسي الواقع فإن درجة حرارة الحرق للطوب الحراري تتوقف على مكوناتها وهي تزداد بزيادة المحتوى من الألومينا، وأقصى درجة حرارة للحرق هي ٦٠٠ - ١٦٥٠ °م لطوب الألومينا ٨٠ - ٩٥%. جداول الحرق التقليدية في الأفران النفقية منخفضة درجة الحرارة وعالية درجة الحرارة موضحة في الأشكال (٣/٤) ، (٣/٥) بالتتالي.

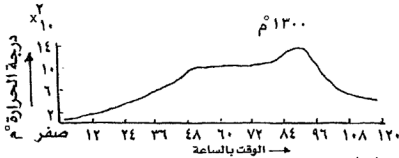


شكل (٢) مخطط الطريقة اللدنة لصناعة الطوب الحراري

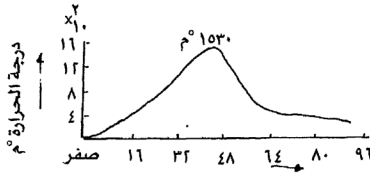
شكل (٢/٢) مخطط الطريقة اللدنة لصناعة الطوب الحراري



شكل (٣) مخطط الطوب الحراري بالطريقة الجافة



شكل (٤) جدول الحرق للحرق منخفض درجة الحرارة للطقل الحراي
في الفرن النفقي



شكل (٥) جدول الحرق عالي درجة الحرارة للطقل
الحراي في الفرن النفقي

خواص الطوب الحراي من الطفلة الحرارية:

خواص الطوب الحراي من الطفلة الحرارية تتوقف على نسب ونوع الطفلة وكمية الألومنيوم، الجروج، المكونات الأخرى الموجودة. وجود مواد غير مرغوب فيها في الطوب الطفل الحراي (حتى ١٥%) مثل السيليكا الحرة والألومينا من عوامل التفكك والتحلل الجوية، الكربونات، أكسيد الحديد، أملاح التيتانيوم والسلفيد، أملاح الكبريتات والقلويات، القلويات الأرضية، المواد الكربونية، هذه المواد تقلل من المقاومة الحرارية للطفلة. تتأثر خواص الطوب الطفلي الحراي بالمحتوى من الرطوبة للطوب المشكل، درجة التجفيف، ومدة ودرجة حرارة الحرق وعملية التصنيع. لذلك فإن ضبط المكونات وعملية التصنيع يتم لإنتاج طوب حراي مناسب لاستخدام محدد.

اللون:

عموما بنبي فاتح أو لامع فاتح. يتوقف لون الطوب الطفلي الحراري على محتوى المادة الخام من الحديد. الطوب بالمحتوى العالي من الحديد له لون غامق. تتوقف الصلابة وتختلف طبقا لدرجة حرارة الحرق. الطوب الحراري الصلب الذي أجرى له الحرق الصحيح يكون بصلابة مثل صلابة الصلب.

المسامية:

تتراوح المسامية ما بين ٨ إلى ٢٤% طبقا لدرجة الحرارة التي تم عندها الحرق. كلما زادت المسامية كلما قلت المقاومة لعوامل التآكل لمحتوى الفرن وعوامل المساعدة في الصهر (Fluxes)..الخ، وكذلك انخفاض تأثير التغيرات المفاجئة في درجة الحرارة. كمية ونعومة الجروج المستخدم تؤثر كذلك على المسامية لهذه الحراريات.

الخواص الكيماوية:

عند درجات الحرارة المرتفعة الطفلة الحرارية تتحد مع القلويات مثل الصودا والسبوتاس...الخ، قلويات أخرى مثل الجير المطفي المجنزيا وأكسيد الحديد، نواتج الحريق....الخ، أو مع الأملاح مثل الكلوريدات، الكبريتات والكربونات من الألومينات المنصهرة، السيليكات وألومينات السيليكات (alumino silicates).

مقاومة الخبث: (Resistance to Slag)

مقاومة الخبث والمواد العدوانية الأخرى لا يعود إلى مكونات الطفلة ولكن يرجع إلى تماسك وتناسب الشكل العام للسطح. لذلك فإن الحراريات المحروقة عند درجات حرارة مرتفعة جدا لها مقاومة جيدة لعدوانية الخبث. الخبث المحتوى على كربونات أو نترات الصوديوم أو البوتاسيوم تكون عدوانية تحديدا. كلما قلت دقة شكل حبيبات الحراريات كلما زادت مقاومتها للمجالات العدوانية المختلفة.

في حالة وجود أول أكسيد الكربون في الغازات العادمة، فإنه يتحلل بفعل الطفلة الحرارية عند درجات الحرارة العالية مع ترسيب الكربون عند ٤٠٠ - ٩٠٠ °م.

القوة ومقاومة السحق والتفتت strength, resistance to crushing

تتغير قوة مقاومة السحق للطوب الحراري طبقاً لدرجة الحرارة. الطوب الطفل الحراي العادي والذي له إجهاد سحق (crushing strength) مثل ٩٥٠ كيلوجرام/سم^٢ عند البرودة، يكون قوة السحق المختلفة الآتية عند مختلف درجات الحرارة.

درجة الحرارة	حمل الكسر كج/سم ^٢
٢٠ °م	٩٥٠
٨٠٠ °م	٥٥٥
١٠٠٠ °م	٤٧٥
١٣٠٠ °م	٣٦٠
١٥٠٠ °م	٦٥

يوجد خفض كبير في قوة السحق أو الكسر عند حوالي ٨٠٠ °م والذي له أهمية كبيرة في تكنولوجيا الأفران.

السحق البارد للحراريات التي تم حرقها جيداً يكون أعلى عن ذلك للحراريات اللينة (soft) المحروقة. طبيعي، قوة الكسر على البارد للطوب الطفلي الحراري يختلف ما بين ٢٠٠ إلى ٤٠٠ كجم/سم^٢ طبقاً للمكونات، الشكل، ودرجة حرارة الحرق.

المقاومة الحرارية (Refractoriness)

المقاومة الحرارية هي مقاومة الانصهار للحراريات عند الارتفاع المنتظم في درجات الحرارة وفي عدم وجود ظروف اضطراب. الطفل الحراري يختلف كثيراً في المقاومة الحرارية طبقاً للطفل الحراري المستخدم في صناعته. توجد ثلاث درجات من الطفل الحراري:

- الدرجة الأولى لها درجة حرارة للبيونة ما بين ١٧٧٠ - ١٧٩٠ °م
- الدرجة الأولى لها درجة حرارة للبيونة ما بين ١٦٧٠ - ١٧٧٠ °م
- الدرجة الثانية لها درجة حرارة للبيونة ما بين ١٥٨٠ - ١٦٧٠ °م
- الدرجة الثالثة لها درجة حرارة للبيونة ما بين ١٥٨٠ - ١٦٧٠ °م

لذلك فإن القوة الحرارية لطوب الطفل الحراري تقابل نقطة الليونة للطفل

الحراري المستخدم.

اختلافات كثيرة في المقاومة الحرارية لطوب الطفل الحراري تختلف ما بين مكافئ القمع الحراري (pyrometric cone equivalent) في القيم لـ ٣١ أكثر من إلى ٣٤ طبقاً لنوع الطفل المستخدم، محتواها من الألومينا ونوع الجروج المستخدم. أقصى درجة حرارة استخدام آمنة لطوب الطفل الحراري والحراريات الأخرى هي ١٥٤٥ °م.

المقاومة الحرارية تحت الأحمال (Refractoriness Under Load)

كل الطفل الحراري مع قليل من الاستثناءات له نقطة ليونة عند ١٣٥٠ °م تحت حمل ٣,٥ كجرام/سم^٢.

طوب الطفل الحراري عادة لا يسقط عند درجة حرارة أقل من ١٣٥٠ °م تحت حمل يساوي ٢ كجرام/سم^٢. المقاومة الحرارية تحت الأحمال تتوقف على المكونات الكيميائية والبناء الكيميائي للمادة. الملوثات مثل الحديد، الفلوي... الخ لها تأثير ضار وملاحظة على المقاومة الحرارية تحت الأحمال.

تأثير الحرارة (Effect of Heat)

عند تسخين الطفل الحراري تحدث أربع تغيرات واضحة:

١. الشوي أو التكليس (Baking)

الخبز هو التسخين حتى تتحلل الطفلة ولا يوجد فقد إضافي في الماء ويصبح الطفل مسامي. يحدث الخبز ما بين ٥٠٠ - ٦٥٠ °م.

٢. التزجيج (Vitrifying)

التزجيج هو التسخين لحين انصهار المكونات وتبدأ الكتلة في فقد شكلها. التزجيج يحدث ما بين ١٥٥٠ - ١٧٧٠ °م.

٣. التليين هو التسخين حتى بداية الانصهار للمكونات وبداية فقد الكتلة لشكلها ويحدث هذا ما بين ١٥٥٠ - ١٧٥٠ °م.

٤. الصهر (Fusion)

الصهر هي المرحلة التي عندها يحدث تغير للمادة من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة. تحدث هذه المرحلة عند درجة حرارة أعلى من ١٧٧٠ °م. أثناء الصهر يتحلل المولليت ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) ليكون خليط من الكورندم (Al_2O_3) (corundum) والمولليت.

المرحلتين الأوليتين هي عموماً تامة عند حرق الحرارية (مثل الطوب الحراري أو الكتل) بعد تصنيعها. بهدف إكمال هذه المراحل، فإن حرق الحرارية أثناء تصنيعها يجب أن يكون عالياً ما أمكن بحيث أن التغيرات في الحجم، التي تصاحب هذه المراحل، تكون تامة. المراحل الثالثة والرابعة للتسخين قد تحدث عند الاستخدام الحقيقي للحراريات في الفرن.

التشقق والتكشف أو حساسية التغير المفاجئ في الحرارة:

Spalling or Susceptibility to Sudden Changes in Temp

تفتت الحرارية عند التبريد السريع يسمى (spalling). كثيراً من طوب الطفل الحراري يتفتت عند التبريد السريع جداً. طوب الطفل الحراري الكثيف تفتت بسرعة أكبر عند التبريد المفاجئ. لذلك لزيادة المسامية لذلك يضاف الجروج أو نشارة الخبث للطفل الحراري، ولكن مع زيادة المسامية فإن مقاومة الحرارية للضغط، الاحتكاك والتآكل تقل. لذلك فإنه يتم ضبط مكونات الحرارية لعدم حدوث زيادة في المسامية الغير ملائمة.

الأسباب الرئيسية للتشقق أو التفتت للطفل الحراري هي:

- انخفاض نسبة مادة الربط.
- الخلط الغير كافي.
- استخدام الضغط الغير منتظم أو الغير كافي أثناء التشكيل.
- عدم انتظام التسخين والتبريد للفرن عند حرق الحرارية.

يمكن زيادة مقاومة التشقق باستخدام الجروج الخشن، زيادة المسامية وخفض معامل التمدد.

طوب الطفل الحراري هو من الحرارية المستخدمة عادة نظرا لانخفاض سعره. استخدامه في الظروف القلوية يجب تجنبه نظرا لأنه له طبيعة حامضية إلى حد ما. نظرا لمقاومته الممتازة للإجهاد الحراري، فإن طوب الطفل الحراري يستخدم في أفران الاسترجاع (regenerative furnace) (حيث تحمي غازاته الداخلة بالغازات المنطلقة)، والمسترجعات (التي تعيد بعض الحرارة المنطلقة إلى الغاز أو الماء). يستخدم هذا الطوب للعوازل في تبطين المدخن، سباكة الصلب، الأسمنت، الخزفيات، وفي صناعة البتروكيماويات وصناعة الصلب. كذلك يستخدم الطوب الحراري في الأفران اللافة (blast furnace)، موافد اللفح الساخن، التلييد، التحميص، أفران صهر الزجاج وإعادة التسخين.

الحرارة النوعية (Specific Heat)

الحرارة النوعية لطوب الطفل الحراري منخفضة لتكون 0.25 وهي ترتفع سريعا مع ارتفاع درجة الحرارة لتكون 0.264 عند 1300°C .

التوصيل الحراري (Thermal Conductivity)

يختلف التوصيل الحراري للطفل الحراري من 0.8 إلى 0.9 عند درجة حرارة من 300°C إلى 1100°C . الطفل الحراري رغم أنه موصل ردي للحرارة إلا أنه له قوة إشعاع عالية. لذلك فالمواد الموضوعة في غرف الحرق المصنوعة من الطوب الحراري يمكن تسخينها إلى درجة حرارة عالية رغم أن التوصيل الحراري للطفل الحراري منخفض.

المقاومة الكهربائية:

تختلف المقاومة الكهربائية لطوب الطفل الحراري من 1.34×10^{-8} إلى 8.9×10^{-2} ما بين 800 ، 1500°C .

قوة التحمل للطفل الحراري:

الطفل الحراري الأكثر تحملا والأفضل يجب أن تكون له كثافة واضحة، ومقاومة عالية للخبث، وقوة كسر عالية ولا يحدث له تغير في الحجم عند التسخين.

الخواص:

خواص طوب الطفل الحراري موضحة في الجدول التالي:

استخدام الطفل الحراري:

يستخدم الطفل الحراري أساسا في مختلف أنواع الافران الحرارية، وإعادة الاستخدام للغازات العادمة، الغلايات وكثيرا من الإنشاءات المشابهة التي يتم فيها توليد الحرارة أو التي خلالها تمر الغازات الساخنة (مثل أفران اللفح). بسبب معامل التمدد الحراري فإن طوب الطفل الحراري تكون مقاومة لإجهاد التشنق. الحراريةات المحتوية على نسبة عالية من الجروج لها مقاومة عالية للتشنق عن تلك المحتوية على حبيبات دقيقة وخلطات منخفضة من الجروج.

جدول لخواص طوب الطفل الحراري

القيم النموذجية		مقاومة		الكثافة		النسبية		المقاومة الحرارية °م		نسبة		نوع طوب العنقل الحراري
الوقت	درجة الحرارة °م	%	الصلابة	أجود الكسر كج/سم ²	كج/سم ³	%			Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃		
١ ساعة	١٣٥٠	٠,٥ ±	جيد	٢٥٠/٢٠٠	٢-١,٩٥	٧٥-٢٢	١١٥٥	٢,٥-٢	٢٢-٢٠	متوسط المقاومة الحرارية عالي المقاومة الحرارية ناقص المقاومة الحرارية		
٢ ساعة	١٤٠٠	٠,٥	جيد	٢٢٠/١٧٠	٢,١-٢	٢٢-٢٢	١٢٩٩-١٧١٧	٢,٥-٢	٤٠-٢٨			
٢ ساعة	١٤٥٠	٠,٥	جيد	٢٠٠/٤٠٠	٢,٢-٢,١	١٦-١٥	١٧٤٢-١٧٦٢	١,٥-١	٤٤-٤٢			
٢ ساعة	١٤٥٠	٠,٥	ممتاز	٢٠٠/٢٥٠	٢,٢-٢,١	٢٠-١٨	١٧٤٢-١٧٦٢	١,٥-١	٤٤-٤٢			

السيليكا الحرارية (Silica Refractories)

المواد الخام للسيليكا الحرارية هي الأشكال المختلفة للرواسب الطبيعية لـ SiO_2 مثل الكوارتز، الكوارتيزيت، الجانستر، الرمل، الحجر الرملي.....الخ. وجود زيادة من الأكاسيد القلوية يكون غير مطلوب نظرا لأنها تقلل من درجة حرارة الانصهار. أحد المصاعب الكبيرة بالنسبة للسيليكا الحرارية هي أن السيليكا توجد في عدة أشكال متأصلة (allotropic forms) والتي تكون ثابتة عند درجات الحرارة المختلفة ولها أوزان نوعية مختلفة. لذلك يتم اختيار المادة الخام التي يمكن تحويلها بسهولة إلى الشكل الأكثر ثباتا. لهذا السبب فإن الرمل العادي والكواتيزيت النقي ليس كافيا. المادة الخام يجب أن يكون لها بعض مادة البناء والمفضل أن تكون حبيبات السيليكا الدقيقة نفسها. في الواقع، فإن الكوارتز هو الشكل الأكثر ثباتا عند درجة حرارة العادية والكوارتيزيت هو الأكثر استخداما لأنها الشكل الطبيعي للكوارتز المتاح لعمل طوب السيليكا. ولكن الكوارتيزيت الذي يحتوي على ٩٦ - ٩٧ % SiO_2 مع أقل من ٣ % $\text{CaO} + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ محتوى من القلويات لا يزيد عن ٠,٥ % ، مع مراعاة أن زيادة نسبة الملوثات تقلل من قدرة المقاومة الحرارية كثيرا.

الربط بين حبيبات السيليكا يتم بواسطة لبن الجير (Ca(OH)_2) والذي يعمل على أن يجعل من تكون كلا من التراديميت والكريزيتوباليت (tridymite, cristobalite). مواد معدنية أخرى (مثل FeO , Borax , Mg , Ba والكربونات والفلوريدات وفوسفات الليثيوم والصوديوم والبيوتاسيوم....الخ) يتم إضافتها إلى المواد الخام لصناعة طوب السيليكا الحراري بأقل كمية مطلوبة نظرا لأنها تقلل من المقاومة الحرارية لطوب السيليكا. يستخدم كذلك خليط من الطفل والجير (lime) للربط، ولكن النسبة العالية من هذا الجير الحي تقل لمقاومة الاحتكاك وقوة طوب السيليكا الحرارية. ولإنتاج طوب ذو طبقة سطحية صلبة (hardened case) وتحسن في القوة الميكانيكية يستخدم الغسول القلوي لسلفيت السيليلوز (cellulose sulphitelye) كمادة ربط. عند استخدام القار، الصمغ،

المولاس....الخ كمادة ربط فإن ذلك يزيد من قوة الطوب قبل الحرق. تزداد مقاومة طوب السيليكا ضد عدوانية الخبث بإضافة الزركون (zircon)، ولكن إجهاد الضغط للحراريات من الزركون والكوارتز أقل من تلك كمادة للكوارتيزيت أو الزركون. وعند الرغبة في إنتاج طوب السيليكا له كثافة عالية وخواص جيدة، يتم خلط حبيبات الكوايتزيت الخام الخشن (١ - ٣ ملمتر)، المتوسط (٠,٢ - ١ ملمتر) والدقيق (٢٠,٢ ملمتر) بعد غسلها (للتخلص من الأتربة والملوثات) ثم التفسير والطحن (في كسارة فكية ومطحنة الكور)، على أن يتم الخلط بنسب ٣٥ - ٤٠ %، ١٠ - ١٥ %، ٤٥ - ٥٠ % بالتالي.

التصنيع (Manufacture)

لصناعة طوب السيليكا فإن المواد المدرجة (مثل الكوارتيزيت) يتم خلطها مع الكمية المطلوبة من مادة الربط (مثل الجير المطفي) والماء في المطحنة العامة (pan mill) أو في خلاط ذو القاع الدوار في عكس اتجاه التدفق (in a pan mill or revolving bottom counter flow mixer) عند ارتفاع درجات الحرارة فإن أكسيد الكالسيوم (lime) يكون سيليكات الكالسيوم للقابلية للانصهار والتي تعمل كمادة ربط. يتم عندئذ تشكيل الخليط يدويا في شكل كتل أو بالضغط بالماكنية للتشكيل. المحتوى من الرطوبة في الخليط الشبه جاف (الذي يسمى الكتلة اللدنة tempered mass) يتوقف على نوع التشغيل ويترأخ ما بين ٤ - ٥ % للضغط الهيدروليكي، ٧ - ٩ % للتشكيل اليدوي. بينما المحتوى المنخفض من الرطوبة يتطلب ضغط أعلى للتشكيل، إلا أن زيادة المحتوى من الرطوبة تزيد الفرصة لتشقق الطوب المضغوط عند التحرر من القوالب. بسبب عدم تجانس الضغط، فإن منتجات التشكيل اليدوي من الطوب تكون ذات صلابة أو كثافة غير متساوية بينما التشكيل بالماكنية ينتج الطوب بصلابة عالية وكثافة متجانسة. ضغط التشكيل العالي ينتج طوب له مقاومة منخفضة لمقاومة الصدمات الحرارية وذلك لأن الكتلة المدمجة جيدا مع التسخين فإنها تتشقق بسبب عدم وجود فاصل كافى بين حبيبات السيليكا التي تتمدد. الضغط الهيدروليكي

ينتج طوب له كثافة عالية ومسامية منخفضة، وقوة كسر عالية على البارد بينما القطاعات الثقيلة يتم تشكيلها يدويا. لإنتاج الأشكال القياسية فإنه يستخدم الضاغط بالاحتكاك (friction pressing) أو ضاغط المنضدة الدوارة (rotating table) وذلك في حالة الإنتاج الكمي. معدل التشكيل يتوقف على شكل وحجم الطوب وقد يتراوح ما بين ١ إلى ٣٦ طوبة في الدقيقة القوالب والفرم لطوب السيليكا تكون أقل من الحجم (underside) لحدود التجاوز المسموح به في التمدد ذلك لأن حجم السيليكا يزداد مع التسخين. يتم تجفيف الطوب في حجرات يتم تسخينها.

التجفيف العادي لطوب السيليكا قد يستغرق من ٤٨ إلى ٩٦ ساعة بينما التجفيف في الغرف الساخنة يحتاج إلى ١٢ ساعة أو أقل. الطوب المجفف يحتوي على أقل من ٠,٢% رطوبة. تجفيف الطوب يجب أن يكون متجانسا خلال داخل وخارج الطوب لتجنب تكوين التشققات. تستخدم كذلك المجففات النفقية باستخدام بخار الماء أو الغاز الساخن العادم والناجح من لهب الفرن وذلك لتجانس جفاف الطوب. عند التجفيف في الغرف/ الأرضيات الساخنة فإن الطوب يحتاج إلى التقليب من آن إلى آخر للمحافظة على معدل تجفيف ثابت.

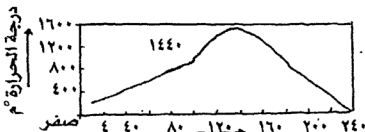
الطوب الذي يتم تجفيفه في الغرف الساخنة، عندئذ فإن الطوب الجاف يلزم تداوله بحرص لتجنب انهياره. يلي ذلك النقل للأفران التي يتم تسخينها بحرق الغاز أو الفحم. في صناعة الطوب الحراري فإن الماء العالق كيميائيا وميكانيكيا يتم إزالته أولا. مع استمرار التسخين فإنه يحدث تغيرات معدنية وتغيرات في الحجم. في حالة طوب السيليكا هدف هام آخر من التسخين هو لتحويل الكوارتز إلى الكريزوتوباليت أو تراسي ديمائيت والتي هي النظائر للسيليكا الأكثر ثباتا. عند عدم حدوث هذا التغير عند الحرق، فإن الحجم سوف يتغير أثناء الاستخدام ويصبح المنشأ ضعيف. يتم رفع درجة الحرارة ببطء في حوالي ٢٤ ساعة إلى حوالي ١٥٠٠ °م والاستمرار عند درجة الحرارة هذه لمدة من ١٠ - ٢٠ ساعة تقريبا وذلك ليتمكن للكوارتز أن يتحول إلى الكريزوتوباليت والذي يتحول ببطء إلى التراسي ديمائيت عند التبريد. المحافظة على

استمرار درجة الحرارة عند ١٥٠٠ °م لمدة أطول يكون مفضلا ولكنه ليس اقتصادي. يتم التبريد بحرص شديد ويستغرق من ١ - ٢ أسبوع. ينتج عن هذا تكون خليط من الترايديمائيت والكريزتوباليت.

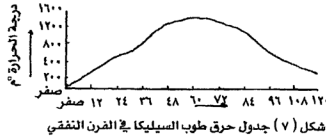
معدل التسخين والتبريد لطوب السيليكا أثناء التحول يجب أن يكون بطيئا جدا. تبريد طوب السيليكا عند درجة حرارة أقل من ٦٠٠ °م يجب أن يكون بطيئا جدا لتجنب تشققه ونقشه. الاختبار المجهرى لطوب السيليكا الذي تم حرقه جيدا يظهر فقط الترايديمائيت والكريزتوباليت.

يتم حرق طوب السيليكا في أفران اللهب الهابط (down draught) من نوع الحرق على دفعات (batch type). يتم توفير الغاز الكافي ما بين السقف الطبقة العليا لطوب السيليكا في الفرن كذلك فإنه يتم تجنب الالتصاق القريب للطوب في الفرن وذلك للسماح للتمدد مع التسخين. حرق طوب السيليكا ينتج عنه التخلص من الماء و المواد العضوية الموجودة فيه، وكذلك التزجيج للسيليكا التي تتكون بالتفاعل الكيماوي للجير المحروق (lime) أو القلويات الأخرى مع السيليكا وتحول الكوارتز إلى الترايديمائيت والكريزتوباليت. كذلك فإن حرق طوب السيليكا يمكن أن يتم في الفرن النفقي (tunnel kiln).

جدول الحرق لطوب السيليكا في فرن حريق الغاز الهابط ذو المرحلة الواحدة وفي الفرن النفقي موضح في الأشكال (٣/٦)، (٣/٧).



شكل (٦) جدول حرق طوب السيليكا في الفرن النفقي بتيار الغاز الهابط



شكل (٧) جدول حرق طوب السيليكا في الفرن النفثي

شكل (٣/٧)

الخطوات المختلفة في الطريقة الحديثة لصناعة طوب السيليكا موضحة في الشكل (٣/٨).

الخواص:

طوب السيليكا يكون له لون أصفر مع بقع صغيرة بنية اللون موزعة خلال الكتلة. المسامية هي حوالي من ٢٢ - ٢٦% والوزن النوعي هو ٢,٣ إلى ٢,٣٥. الخاصية الهامة هي أن الكوارتيزيت يتحول إلى تراديمايت عند ٨٧٠ °م والذي يتحول إلى كريزتوباليت عند ١٧٤٠ °م، كل من هذا له أشكال الفا و بيتا و أوزان نوعية مختلفة. يمكن تلخيص التغيرات كالاتي:

(يسبب هذه التحولات) هو ٣,٥%. لذلك فإنه في حالة حرق طوب السيليكا وعدم تحول الكوارتز إلى التراي ديمائيت والكريزتوباليت فإن الطوب سوف يتمدد عند الاستخدام في الأفران وسوف يسقط المنشأ.

تأثير الكيماويات:

السيليكا لا تتأثر بأي أحماض عدا حامض الهيدروفلوريك وحامض الفوسفوريك. حامض الهيدروفلوريك يتفاعل مع السيليكا في درجة الحرارة العادية وحامض الفوسفوريك عند ٤٠٠ م°. المركبات القلوية والقاعدية تتفاعل مع طوب السيليكا عند درجة الحرارة المرتفعة مكونة سيليكات معقدة قابلة للانصهار. القلويات تتفاعل مع السيليكا الحرارية، وخاصة عند درجة الحرارة العالية مكونة سيليكات معقدة قابلة للانصهار.

الكربون يتفاعل مع السيليكا عند درجة الحرارة المرتفعة، أكبر من ١٢٠٠ م° مكونا سيليكون وأول أكسيد الكربون وفي بعض الحالات يتكون كربيد السيليكون كذلك.

تأثير الحرارة على السيليكا:

عند تسخين السيليكا الحرارية فإنه تحدث فيها التغيرات التالية:

- عند التسخين إلى ٥٧٥ م° فإنه يتكون كوارتز بيتا (B - quartz) .
- عند التسخين إلى ٨٧٠ م° يتكون (B - tridymite)
- عند التسخين إلى ١٤٧٠ م° يتكون (B - cristobalite).

الكريزتوباليت الذي هو مستقر إلى حد ما يميل إلى التحول إلى تراي ديمائيت في حالة التسخين ما بين ١٤٧٠ إلى ١٥٠٠ م° باستمرار لمدة طويلة. عند التبريد كل التغيرات السابقة تحدث في الاتجاه العكسي حتى ٢٧٠ م°.

وأقل من ٢٧٠ م° تحدث التغيرات التالية:

- من ٢٧٠ م° إلى ١٨٠ م° تتحول (B - cristobalite) إلى الشكل هـ (ألفا)
- من ١٨٠ م° إلى ١٥٠ م° يتحول (B - tridymite) إلى الألفا ثم ببطء شديد

إلى الكوارتز.

التبريد من ٢٧٠ °م إلى درجة حرارة الجو يصاحبه تغير كبير في الحجم وهناك خطورة من التشقق والانهييار، لذلك فإن هذا التبريد يتم ببطء شديد.

التغير في الحجم عند تسخين السيليكا الحرارية:

التغير في الحجم عند تسخين السيليكا الحرارية يعتبر هام جدا ذلك لأن ثبات السيليكا الحرارية يتوقف على هذا التغير في الحجم عند التعرض للتغير المفاجئ في درجة الحرارة. هذه التغيرات في الحجم تعود إلى التغيرات الأصلية التي تحدث في السيليكا. هذه التغيرات تحدث تغيرات في الوزن النوعي والذي بالتالي يسبب تغيرات في الحجم.

التغير من ٥ إلى B للكوارتز من ٢٠٠ إلى ٥٧٥ °م يصاحبه تغير في الحجم بنسبة (١٤%) بالزيادة.

عند ٨٧٠ °م وعند تكون بيتا تراي ديمائيت (B - tridymite) فإنه تحدث زيادة في الحجم من ١٤% إلى ١٦%.

عند تحول السيليكا إلى الكريزيتوباليت أي بتسخين السيليكا الحرارية حتى ١٤٧٠ °م من درجة حرارة الغرفة فإن ذلك يصاحبه زيادة ٢٠% في الحجم وخفض الوزن النوعي من ٢,٦ إلى ٢,٢٣.

معامل التمدد الحراري من ١٥ ° إلى ٩٤٠ °م هو حوالي ٠,٠٠٠٠٠٥١ بوصة لكل ١ °م للبوصة بينما معامل التمدد من ١٥ °م إلى ١١٨ °م يكون بمتوسط ٠,٠٠٠٠٠٦٤ بوصة لكل ١ °م.

المقاومة الحرارية (Refractoriness)

أفضل أنواع السيليكا الحرارية له نقطة ليونة من ١٧١٥ إلى ١٧٦٠ °م. تتوقف المقاومة الحرارية على الآتي:

- نسبة الجير، الصودا، البوتاس الموجودة في الحرارية.
- شكل وبناء الحرارية.

• طريقة ومدى الحرق.

القدرة الحرارية تحت الأحمال:

طوب السيليكا عند التسخين تحت أحمال ٣,٥ كج/سم^٢ فإنه ينهار عند درجة حرارة ما بين ١٣٥٠ إلى ١٤٧٠ °م. وتحت أحمال ٢ كجرام/سم^٢ فإن القدرة الحرارية تحت الأحمال تتغير من ١٦٥٠ إلى ١٦٩٠ °م طبقاً للمكونات الكيماوية. أقصى درجة حرارة تشغيل لطوب السيليكا تحت الأحمال هي عادة ١٦٨٠ °م عند ٣ كج/سم^٢.

القوة الميكانيكية:

القوة الميكانيكية تتغير من ٢٥٠ - ٤٥٠ كجرام/سم^٢ طبقاً للمكونات. إجهاد الكسر لطوب السيليكا يتناسب مع نعومة الكوارتز المستخدم، نسبة الماء المضاف لعمل العجينة ونسبة مادة الربط المضافة.

التشقق والتشقق (Spalling):

التغير المفاجئ في درجة الحرارة يحدث تشققات شعرية في طوب السيليكا وهذا يسبب التحلل أو الانهيار. ويرجع ذلك إلى الأسباب الآتية:

- حدوث تشققات في الحرارية إذا كان التحول من الكوارتز إلى الكريزتوباليت أو إلى التري ديمائيت غير تام وأن هذا التحول يحدث مفاجأة بسبب الارتفاع السريع في درجة حرارة الحرارية. هذا النوع من التشقق يمكن تجنبه بتكرار رفع درجة الحرارة للحراريات بمعدل بطئ حتى ٨٠٠ °م ثم التبريد البطئ.
- يمكن أن يحدث هذا التشقق بسبب عدوانية الخبث.
- توجد إجهادات عند تبريد طوب السيليكا أقل من ٢٥٠ °م بسبب تحول الكريزتوباليت.

عموماً، يمكن خفض هذه العيوب في السيليكا الحرارية باتباع الوسائل الآتية.

- بتكرار التسخين للحراريات حتى 800°C ثم التبريد ببطء. بهذا فإن الكوارتز يتحول إلى ترائي ديمائيت وليس الكريزتوباليت.
- باستخدام حراريات ذات حبيبات خشنة.
- بزيادة المسامية وخفض الكثافة.

التوصيل الحراري:

التوصيل الحراري للسيليكا الحرارية أعلى منه بالنسبة لطوب الطفل الحراري. فهو يتراوح ما بين 0.003 إلى 0.004 كالوري/سم/ ثانية عند درجة حرارة من 700°C إلى 1100°C .

الحرارة النوعية: (Spacific Heat)

هي حوالي 0.26 .

خواص طوب السيليكا الحراري الجيد :

- النوعية الجيدة من طوب السيليكا يجب أن يكون بها الخواص الآتية :
- المقاومة الحرارية يجب أن تكون مرتفعة حتى 1690°C .
- نسبة السيليكا يجب أن تكون مرتفعة ما أمكن ذلك وأن نسبة الأكاسيد الأخرى يجب أن تكون منخفضة جدا .
- يجب أن يكون له إجهاد كسر مرتفع .
- عند الإستخدام يجب ألا يكون هناك أي تغير في الحجم ما أمكن ذلك .
- يجب أن يتم حرقه إلي الحد أن يكون له إجهاد شد مرتفع في حالة السخونة .
- يجب أن يكون التشقق أقل ما يمكن عند التعرض للتغير المفاجيء في درجة الحرارة.

خواص بعض أنواع طوب السيليكا الحراري موضح في الجدول التالي :

نوع طوب السيالكا المستخدم	أقصى نسبة% ل SiO_2	أقصى نسبة% ل CaO	أقصى نسبة% ل $Al_2O_3 + TiO_2$	أقصى نسبة% ل Fe_2O_3	المقاومة الحرارية م	القدرة الحرارية تحت حمل ^٢ كجم/سم ^٢	المسامية %	الكثافة ^٣ م/سم ^٣	أجهاد الكسر ^٢ كجم/سم ^٢	التعبير الطولي الثابت عند ١٤٥٠°م لمدة ٢ ساعة
الأفران العامة	٩٤	٢,٧٥	١,٥	١	١٦٨٥°م	١٦٧٠°م	٢٥	١,٩-١,٨	٣٠٠-٢٥٠	١+
فرن الكوك	٩٤	٢,٢٥	١,٥	١,٥	١٦٨٥°م	١٦٥٠°م	١٧-٢٤	١,٩-١,٧	٣٠٠-٢٥٠	٠,٤+
آداء متفوق(كما في حالة سقف فرن الزجاج)	٩٣	٢	٠,٥	٠,٥	١٦٨٥°م	-	٢٤	١,٩-١,٧٥	٤٠٠-٣٠٠	١+
سقف الفرن	٩٤	٢,٥	١,٥	١	١٦٨٥°م	١٦٥٠°م	٢٤	١,٧٥-١,٧	٣٠٠-٢٥٠	١+
محول بسمول ومعرفة تقل	٩٤	٢,٥	١,٥	١	١٦٨٥°م	١٦٥٠°م	٢٤	١,٧٥	٣٠٠-٢٥٠	٢+

استخدامات السيليكا الحرارية :

طوب السيليكا يتمدد مع التسخين . لذلك فإن حراريات السيليكا مفيدة في الأغراض التالية:

- حيث لا يكون مطلوب أي انكماش في الحراريات كما في حالة حواقي فرن الكوك .

- حيث يكون المطلوب مقاومة عالية للحرارة .

تستخدم السيليكا الحرارية في تبطين الأفران وفي الأسقف والعقود والأجزاء العليا للأفران، أي في الأجزاء الأكثر سخونة في الأفران .

يسبب التوصيل الحراري العالي لحراريات السيليكا ، فإن طوب السيليكا يستخدم عالميا في بناء أفران الكوك وذلك في حوائط الفرن ، التجمعات العلوية للغازات العادمة ، وسقف الفرن وكذلك الجزء السفلي للفرن إلخ . وفي صناعة الزجاج ، يستخدم طوب السيليكا في سقف وأجزاء الحرق للأفران . بسبب المقاومة الممتازة لإجهادات الضغط عند درجة الحرارة العالية ، فإن سقف وأعمال تحديد المقدار والاتجاه للفتح الفرن الساخن (في فرن اللفح) يتم تبطينها بطوب السيليكا عالي الكثافة وله معامل مساحة سطحية كبير حيث درجة حرارة الموقد تظل مرتفعة خلال كل عملها وأنه لا يوجد اختلاف في درجة حرارة السقف (القبو) أثناء فترة دخول الغاز ودخول اللفح في المواقف . بسبب خواص ملاءمتها العالية عند درجات الحرارة العالية والاداء الجيد عند درجات الحرارة العالية ، فإن طوب السيليكا يستخدم في أسقف فرن المجرمة المكشوفة (Open Hearth) إلى جانب العقود والأسقف والأجزاء العليا لمختلف الأفران .

الطوب الشبه سيليكيا : (Semisilica Bricks) :

الطوب الشبه سيليكيا هو المصنوع من سيليكاتية ذات محتوى من السيليكا من ٧٥ إلى ٩٢ % . وهي تصنع بطريقة تشبه لطريقة طوب السيليكا ، وهي أقل في السعر ويستخدم حيث ظروف التشغيل لا تتطابق مع طوب السيليكا العالي السعر .

رغم المقاومة الحرارية الأقل ، فإن الطوب الشبه سيليك له مقاومة جيدة بالنسبة للتشقق والتشقق أفضل من طوب السيليك . يستخدم طوب شبه السيليك كطبقات ضهارة لطوب السيليك في افران الكوك ، وأسطح الأفران ... إلخ . كما أنه يستخدم كذلك في إنشاء أسقف أفران إعادة التسخين ، غرف المسترجعات ، وأبواب الفرن.. إلخ . وحيث يكون المطلوب التزاوج بين المقاومة الحرارية ومقاومة الخبث والتشقق .

الحراريات عالية الألومنيا : (High Alumina Refractories)

حراريات هذه المجموعة : لا تستخدم بكثرة بسبب ارتفاع سعرها . كقاعدة عامة فإن المقاومة الحرارية تزداد بزيادة المحتوى من Al_2O_3 لحراريات سيليكات الألومنيوم (Aiumino Silicate Refractories مقارنة بالطفل الحراري ، فإن حراريا الألومنيا العالية توفر خدمة أفضل في الظروف الحادة وذلك بسبب مقاومتها العالية للإحتكاك والبري ومقاومة الخبث والتشقق ، والثبات الحجمي الجيد ، المقاومة الحرارية العالية ، الطاقة الأعلى للأحمال . المحتوى من الألومنيا في الحراريات عالية الألومنيا يتراوح ما بين ٤٥% إلى ٩٥% . مكونات بعض المواد عالية الألومنيا المستخدمة في تصنيع تلك الحراريات هي كالآتي :

نوع المواد عالية الألومنيا				المكونات
Diaspore	Bauxite	Sillimanite	Kyanite	النسبة %
٦٤	٦٢-٥٨	٦١	٦٢-٥٨	Al_2O_3
٢٥	٢-١,٢	٣٦,٥	٣٧-٣٤	$Si O_2$
٠,٧٥	١,٤	١,١	٠,٨-٠,٣	Fe_2O_3
١,٢	٣,٤	٠,٧٥	١-٠,٨٨	$Ti O_2$
صفر	صفر	٠,٦	صفر	$Ca O$
٩	٣٠-٢٥	-	٣,٣-٢,٣	الفقد عند الرق

نقطة الإنصهار لكل المواد عالية الألومنيا السابقة هي أكثر من ١٨٠٠ °م والمحتوي من القلويات باستثناء (Cao) معدوم تقريبا .

المواد الخام للطوب الحراري عالي الألومنيا والذي يكون مرتبط كيمائيا أو بواسطة السيراميك (Ceramic Bonded) يتم غالبا تحميلصها المسبق لتحقيق إنخفاض الإنكماش عند الحرق . لتشكيل الخليط يتم الضغط الجاف عادة للمواد عالية الألومنيا والجروج (Grog) [الجروج : هو كسر أو هالك الطوب الحراري عالي الألومنيا] ، كذلك يستخدم التشكيل اليدوي أو الضغط الهوائي (Pneumatic Ramming) للحصول علي بعض الأشكال الخاصة . الطوب الحراري عالي الألومنيا يمكن أن تكون مادة الأساس فيه هي (Mullite ، Sillimanite ، Bauxite أو Corundum) - البوكسيت هو العادي في محتوى الألومنيا الخام وبذا يحسن من المقاومة الحرارية ذلك مع زيادة نسبة الألومنيا إلي السيليكا . ٧٢% ألومنيا في الخليط تنتج حراريات التي يكون بناءها كله من الموليت (mullite) . حرق خليط من البوكسيت أو أي شكل آخر من الألومنيا بالكمية المطلوبة من رمل الكوارتز / الكاولين (المواد الحاملة للسيليكا) ينتج الموليت المخلق . الموليت والألومنيا ألفا هي المجالات الرئيسية الموجودة في حراريات الموليت والتي تكسيها مقاومة عالية ضد التشقق الحراري بالإضافة إلي المقاومة العالية للتآكل وتغير الشكل عند درجات الحرارة العالية . الكيانيت والسيليمانيت (Kynite ، Sillimanite) هي أهم الحراريات لهذه المجموعة وكلاهما يمثل بالمعادلة $(Al_2O_3 \cdot SiO_2)$. كلاهما يتحول عند التسخين إلي المولايت والسيليكا $(3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2)$ في حالة الكيانيت فإن هذا التحول يحدث عند ١٣١٠ °م ويصاحبه زيادة كبيرة في الحجم بينما في السيليمانيت فإن التحول إلي الموليت يحدث عند حوالي ١٦٠٠ °م بدون أي زيادة ملحوظة في الحجم . لذلك ، فإنه من الضروري التسخين الشديد للكيانيت وتحويله إلي الموليت ثم عمل الطوب وأخيرا الحرق بالطرق العادية . يمكن عمل السيليمانيت مباشرة إلي الطوب والحرق كالعادة . في كلا الحالتين ، يستخدم الطفل اللدن كمادة ربط . بسبب تكون الموليت (Mullite) ،

فإن كلا من الكيانيت ، السيليمانديت يقدروا كحراريات مثالية . الموليت يساهم في المقاومة الحرارية العالية (يمكن استخدامه حتى 1800°C ، المقاومة الحرارية العالية تحت الأحمال ، المقاومة الكيماوية العالية ، ومعامل التمدد المنخفض ، لذلك فإن له درجة عالية من مقاومة الصدمات الحرارية . وهذه تعتبر حراريا متعادلة إلي حد ما ويمكن استخدامها في معظم المجالات . كلا من المادتين والسيليمانيت بالتحديد له مقاومة ميكانيكية . وهي مكلفة ولذلك لا تستخدم بكميات كبيرة .

الخواص:

مع زيادة المحتوى من الألومنيا فإن درجة حرارة الإنصهار للحراريات عالية الألومنيا تزداد . فحرارة الإنصهار للحراريات المحتوية علي 50% ألومنيا هي 1763°C بينما تلك المحتوي علي 90% ألومنيا هي 2000°C .
خواص بعض الحراريات عالية الألومنيا موضحة في الجدول الآتي :

مقاومة الصدمة الحرارية لمعظم الطوب العالي الألومنيا سابق ذكره تعتبر ممتازة .

الإستخدام :

حراريات الكياناميت والسيليمانيت تستخدم علي نطاق واسع في أفران تصنيع الزجاج .

الطوب الحراري عالي الألومنيا يستخدم كذلك في مواقع الفرن اللافح (في جزء القبة)، وأفران الإسترجاع الأخرى ، وأفران حرق الجير والأسمنت الدوارة ، سقف فرن القوس الكهربائي ، وأفران من الزجاج ، ومغرفة نقل المصهور المسال. بسبب خاصية عدم اللبل ، فإن الحراريات عالية الألومنيا المرتبطة كيماويا تستخدم خصيصا في أفران صهر الألومنيا . الرماح المثقبة عالية الألومنيا لنفخ الصلب بالغاز الخامل في المغرفة ولإستخدام مواقع اللفح الساخن للفرن اللافح يتم تبطين حوائطها وأبواب الهواء بالحراريات عالية الألومنيا من نوع الموليت كورندم (محتويا ما يزيد عن 78% ألومنيا) يتم التصنيع بخلط الكاولين بمادة الشاموت (Chamotte) التي تحتوي علي

مسحوق الألومينا بحجم حبيبات ١٠ - ٦٠ ميكرومتر ، ثم تشكيل الطوب والحرق عند ١٧٥٠ م° لمدة ٨٠ ساعة . كتل السيليمانيت (حراري عالي الألومينا) تستخدم في صناعة الزجاج .

جدول لخواص بعض الحرارية عالية الألومينا :

نوع الحرارية عالية الألومينا	Al_2O_3 نسبة %	Fe_2O_3 نسبة %	المقاومة م°	الحرارية	المسامية %
Kyanite Base					
درجة I	٦٠-٥٨	١-٤٤,٥	م ١٨٠,٤	٢٢-٢٥	
II	٦٣-٦١	١-٤٤,٥	م ١٨٠,٤	٢٢-٢٥	
II	٦٣-٦١	١-٤٥	م ١٨٠,٤	١٥-١٦	
الأساس من الموليت والكورندم	٧٤-٧٠	٤٤	م ١٨٠,٥	١٦-٢٠	
درجة I	٨٦-٨٤		م ١٨٥,٠	١٨-٢٠	
درجة II	٩٦-٩٤		م ١٨٥,٠	٢٠-٢٢	
درجة III					
أساس البوكسيت					
درجة I			م ١٨٠,٤	٢٠-٢٣	
درجة II	68-71 84-68	٢-٢,٥ ٣-٤	م ١٨٠,٥	١٨-٢٠	

التغير الطولي المستمر			اجهاد الكسر على الباراد كجم/سم ²	الكثافة جم/سم ³
الوقت بالساعة	م°	%		
	١٥٠٠	-٠,٥	٤٠٠-٣٠٠	٢,٤-٢,٢
	١٥٠٠	-٠,٤	٣٠٠-٢٥٠	٢,٩-٢,٣
	١٦٠٠	0.5 ±	٧٠٠-٥٠٠	٢,٥٥-٢,٤٥

الكثافة جم/سم ³	اجهاد الكسر على البارد كجم/سم ²	التغير الطولي المستمر		
		%	م	انوقت بالساعة
٢,٤٥-٢,٥٥	٨٠٠-٦٠٠	-٠,١	١٧٠٠	
٢,٧-٢,٨	٨٠٠-٥٠٠	-٠,٥	١٦٠٠	
٣,٥-٣,٦٥	٨٠٠-٦٠٠	0.3±	١٦٠٠	
٢,٦٥-٢,٧٥	٤٠٠-٣٠٠	٢,٥+	١٦٠٠	
٢,٧-٢,٨	٨٠٠-٥٠٠	١,٥+	١٦٠٠	

طوب البوكسيت (Bauxite Bricks) :

البوكسيت هو الخام الذي يستخرج منه معدن الألومنيوم Al_2O_3 النقي مادة حرارية عالية (نقطة الإنصهار ٢٠١٠ م) ولكن البوكسيت العادي يحتوي علي الحديد والسيليكا كمكونات بما يجعل الطوب ينصهر عند ١٠٠٠ م ولكن كتل الطوب المعدة جيدا يمكن استخدامها حتي ١٧٥٠ م.

بجانب الإحتواء علي أكسيد الحديد والسيليكا ، الذي يعمل علي انخفاض درجة حرارة الإنصهار فإن البوكسيت يحتوي علي ماء التبخر . يتم تسخينه إلي ٦٠٠ م لإزالة الماء ويمكن عندئذ استخدامه مباشرة لتصنيع أنواع الطوب المتدنية . عادة درجة حرارة التخميص هي من ١٤٠٠ إلي ١٥٠٠ م وهذه تمنع أي انكماش تالي في الطوب. يتم طحن المادة التي تم تخميصها وخلطها بالطفل الحراري اللدن وتشكيلها في كتل ثم الحرق عند ١٥٠٠ م.

في الواقع (البوكسيت الذي هو الألومنيا المائية $Al_2O_3 \cdot H_2O$ أو $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ الذي يحتوي علي السيليكا والحديد كمكونات يفقد ما التبخر عند التسخين ما بين ٩٠٠ إلي ١١٠٠ م وينتج (y. Alumina) ذات وزن نوعي ٣,٦٥ . عند استمرار التسخين فإنه يتحول إلي الكورنديم (Corundum) حيث يصبح الوزن النوعي ٣,٩٩ الذي هو أكثر ثباتا في شكل ألفا ألومنيا ($Alumina \alpha$) - البوكسيت المستخدم في عمل الطوب

الحراري يجب أن يحتوي علي ألومنيا أكثر من ٥٨% ، SiO_2 أقل من ٥% ، Fe_2O_3 أقل من ٣% ، TiO_2 أقل من ٣% .

خواص البوكسيت الحراري :

الإنكماش:

يحدث انكماش كبير للبوكسيت الحراري حتي عند درجة الحرارة العالية . وهذه سلبية كبيرة . يمكن التخلص من تأثير هذا الإنكماش بعمل الحراري من البوكسيت المنصهر .

التفاعلات الكيميائية :

لأن البوكسيت قلوي فإنه لا يتآكل بالخبث القلوي . ولكن حراريا البوكسيت يتآكل بالجبر المطفئ . هذه الخاصية لعدم تآكل البوكسيت بالخبث القلوي يجعله متميز علي الطفل الحراري الذي يتعرض لهذه العدوانية .

المقاومة الحرارية:

البوكسيت الحراري أفضل مقاوم من ١٧٩٠ م إلي ١٨٨٠ م.

المقاومة الحرارية تحت الأحمال :

البوكسيت الحراري عند التسخين تحت ضغط ٣,٥ كج/سم^٢ فإنه يلين عند ١٥٠٠ م.

أقصى درجة حرارة تشغيل :

البوكسيت الحراري يمكن تسخينه حتي ١٧٠٠ م - ١٧٥٠ م.

النشقق و النقص عادي في البوكسيت الحراري .

القوة الميكانيكية :

البوكسيت الحراري له قوة ميكانيكية عالية . البوكسيت الحراري المحتوي علي

حتي ٢٥% من الطفل الحراري لا يلين أقل من ١٥٠٠ م عند ضغط ٣,٥ كج/سم^٢

مقاومة البري:

إذا تم التسخين الكافي للبوكسيت قبل تحويله إلى الحراري ، فإنه يكتسب مقاومة عالية للبري .

المسامية :

البوكسيت الحراري عالي المسامية وهذا يقلل من قدرة تحمله عند استخدامه في الأفران .

الإستخدام:

يستخدم في عمل قاع محول بسمر القاعدي وأفران المجرمة المكشوفة (Open Hearth Furnaces) ، وبتطين أفران الأسمنت والأفران الأخرى التي تعمل عند درجات الحرارة العالية .

طوب الكروميت (Chromite Bricks)

حراريات الكروميت هي حراريات متعادلة هامة . المادة الخام هي الكروميت ($Cr_2O_3.FeO$) . وهو يحتوي علي $MgO - Al_2O_3$ الذي يعمل كعامل ربط للطوب . محتوى الخام من Cr_2O_3 يتراوح ما بين ٣٠ - ٦٠ % ، وجود كمية كبير من السيليكا وأكسيد الحديد يقلل من درجة حرارة الإنصهار ، وهذا غير مطلوب .

خام المكروميت المناسب لصنع الكروميت الحراري يجب أن يحتوي علي ما لا يقل عن ٤٠ % Cr_2O_3 ويجب أن يكون صلبا ، وله بناء مجهري دقيق. المكونات المناسبة لخام الكروميت هي:

CaO ، $Cr_2O_3 = ٤٥$ % ، أكسيد حديد أقل من ١٨ % ، سيليكا المغنسيوم ١٠-١٥ % ، SiO_2 ، Al_2O_3 من ٣-٥ % ، TiO_2 والقلويات أقل من ١ % .

بعد التكسير والطحن لخام الكورميت ، يتم خلطه مع الماء ومادة الربط (عادة القار الساخن حيث المواد العضوية قد تستخدم أحيانا) لتحضير عجينه لينة . أحيانا

يتم الخلط الجاف . التشكيل اليدوي أو الآلي للطوب يتم تبريده ببطئ لتجنب عدم تجانس التجفيف وتكون الشقوق . يتم عندئذ حرق الطوب في أفران مستمرة أو ذات الدفعات وينتهي الحرق عند ١٤٠٠ م .
يجب أن يكون معدل التسخين بطيئا لتجنب الإنتفاخ الذي يمكن أن يحدث تفكك للطوب في الفرن في حالة الرص الملاصق .

الخواص :

طوب الكروميت يمكن استخدامه حتى ١٨٠٠ م ومقاومته الحرارية تحت التحميل هي ١٤٣٠ م عند ٣,٥ كج/سم² . عند درجة الحرارة العادية يكون إجهاد الكسر من ٣٥٠ - ٥٥٠ كج/سم² . طوب الكروميت يعتبر مقاوم للخبث القلوي ومتوسط الحموضة ، ولكنه يتأثر بالخبث في الجو المختزل . وهو لا يقاوم الصدمات الحرارية . وله توصيل حراري متوسط .

الكروميت الحراري ينفجر في وجود أكسيد الحديد . وجود سيليكات المغنسيوم غير مطلوب نظرا لأنها تخفض من القدرة الحرارية .

تختلف خواص طوب الكروميت طبقا لمكونات خام الكروميت ونوع مادة الربط المستخدمة . المقاومة الحرارية لطوب الكروميت ذو المحتوى المنخفض جدا من السيليكا يمكن أن تكون مرتفعة إلى ١٩٠٠ م . ولكن عمليا فإنه نادرا ما يستخدم بعد ١٥٠٠ م . طوب الكروميت الحراري بمادة الربط الجيرية أكثر مقاومة حرارية مقارنة بمادة الربط من الطفلة . طوب الكروميت المحتوي علي سيليكا زائدة له مقاومة حرارية منخفضة تحت التحميل ، حيث يسقط عند ١٤٠٠ - ١٤٥٠ م تحت حمل ٢ كج/سم² . طبقا للمكونات فإن الوزن النوعي لطوب الكروميت يتراوح ما بين ٣,٨ إلى ٤ والسامية من ٢٤% إلى ٢٧% .

طوب الكروميت المحتوي علي السيليكا الحرة يتشقق عند ٢٠٠ - ٣٠٠ م ولكن مقاومة التشقق لطوب الكروميت الخالي من السيليكا أفضل من حراريات الماغنيزيت والسيليكا

لأن حساسيتها للصدمة الحرارية تزداد بزيادة السيليكا الحرة .

الإستخدام :

يستخدم طوب الكروميت علي نطاق واسع في أفران صناعة الصلب وتنقية النحاس . وهو مفيد بالتحديد في فصل حراريات الأحماض والقلويات وهو جيد في أي استخدام طالما أنه غير معرض للصدمات الحرارية ولكنه مكلف . طوب الكروميت له تطبيقات كثيرة في صناعة الصلب والمعادن الغير حديدية . فهو يستخدم في قاع حفر السقي لماكينه التشكيل في مصانع الصلب . ولكن إرتفاع سعره يحد من استخدامه .

طوب الكروميت – المجنيزيت

(Chromite – Magnesite Bricks)

سليبات طوب الكروميت هو انخفاض المقاومة للصدمات الحرارية . لقد أدت الجهود للتغلب علي هذه المشكلة إلي إضافة من ١٠ - ٣٠% من أكسيد المغنسيوم المحروق (Mgo) إلي الكروميت . (في الكروميت - المجنيزيت كمية خام الكروم تزيد عن كمية المجنيزيت ، ولكن في حالة زيادة المجنيزيت يسمى الماغنيزيت- الكروم) . يتم ربط الخليط برباط عضوي (مثل المولاس) وتشكيله في صورة قوالب ثم الحرق عند ١٣٥٠ م إلي ١٦٥٠ م . عند درجات حرارة أعلا تحترق المادة العضوية ويتكون رباط سيراميكي .

لأنتاج طوب الكروميت - المجنيزيت القاعدي يتم خلط الكروميت المسحوق مع الماغنيزيت المحمص بنسبة ٧٠: ٣٠ في مطحنة الطفلة / أو مطحنة الأسطوانة الطرفية مع كمية مناسبة من مادة الربط . المادة يجب أن تحتوي $Cr_2O_3 \leq 1\%$ و $\leq 3\%$ Mgo . القوة الميكانيكية تتوفر إما بإستخدام عوامل ربط كيميائية أو بتحقيق الربط عند الحرق . بعد التشكيل للطوب بالطرق الهيدروليكية أو بالطرق الميكانيكية بإستخدام ضغط ٨٥٠ كج/سم² للشكل المطلوب ، يتم التخفيف في ظروف محكمة عند ٦٠ -

٨٠ م . بعد حرق الحرارية الجافة (في أفران نفقية أو ذات الدفعات) عند ١٥٠٠ م -١٦٠٠ م يتم التبريد البطيء لتجنب التلف والإنهيار .

طوب الكروميت المجنيزيت له النوعية الجيدة مثل طوب الكروميت وطوب الماجنيزيت . يمكن استخدامه حتى ١٧٠٠ م ومقاومته الحرارية تحت التحميل هي ١٦٠٠ م عند ٢ كج/سم² . وهو أكثر مقاومة للصدمات الحرارية عن طوب الكروميت . العيب الرئيسي هو أنه ينتفخ وينفجر في وجود الخبث المحتوي علي أكسيد الحديد . عيوب طوب الكروميت - الماجنيزيت تم خفضها بثلاث تحسينات .

الطوب المحسن يعمل بإستخدام الكروميت الخشن المخلوط مع الماجنيزيت الدقيق المحمص وإستخدام عامل الربط كيميائي . الماجنيزيت الدقيق يمنع احتراق الخبث ، وبذا يقلل إنفجار الطوب . الرابط الكيميائي يبعد ويوفر من تكاليف الحرق . التحسين الثالث هو بإستخدام طبقات تبادلية من هذا الطوب مع طبقات من الطوب مغلفة في صناديق مصنوعة من ألواح صلب رقيقة - في الإستخدام الحقيقي ، بسبب درجة الحرارة العالية فإن هذه الصناديق تتصهر معا حيث توفر بناء قوي . نظرا لأن الطوب مغلف في صناديق فهذه تعرف ب (Metalcase) .

الخواص:

- اللون: طبقا لكمية الملوثات (اساسا الحديد) الموجودة فإن لون طوب الكروم - الماجنيزيت يتغير من الرمادي إلي البني القاتم .
- الوزن النوعي : وزنه النوعي حوالي ٣,٨ (مقارنه ب٢,٣ لطوب السيليكا) الذي يحتم إستخدام منشأ قوي لتحمل الحمل الكلي لهذه الحرارية الثقيلة .
- المسامية: المسامية الظاهرة لطوب الكروم - الماجنيزيت تتراوح ما بين ٢٢ إلي ٢٦% ولكن الطوب الأكثر كثافة يمكن تصنيعه كذلك (بضبط درجة حرارة الحرق والوقت) ، ولكن بسبب وزنه النوعي العالي ، فإن فرص انهيار السقف بسبب زيادة حمل الطوب تزداد. المسامية الظاهرة لطوب الكروم - الماجنيزيت الذي يتم حرقه لمدة ٥ ساعات عند ١٣٥٠ م هي حوالي ٢٤% .

- تأثير الخبث : يسبب طبيعته القلوية ، فإنه يقاوم تأثير الخبث القلوي . ولكن إمتصاص أكسيد الحديد بسبب تحلله بسبب تكون مواد إيرية . درجة التحلل لطوب الكروم - المانيزيت تتوقف علي مدي الإمتصاص للحديد (في شكل Fe_3O_4) والذي يسبب إجهاد الشد بسبب نمو حبيبات الكروميت الموجودة في الطوب .
- إجهاد الكسر على البارد : إجهاد الكسر لطوب الكروم - المانيزيت ما بين ٢٥٠ كج/سم^٢ (للنوع المحروق) إلى ٤٥٠ كج/سم^٢ للطوب المرتبط كيمائيا المستخدم في تبطين الأسقف .
- مقاومة التشقق الحراري : رغم أنه أقل من طوب الطفل الحراري ، إلا أن مقاومته للتشقق أعلا من تلك لطوب الكروميت أو المانيزيت .
- المقاومة الحرارية تحت التحميل : (Refractoriness Under Load) : مقاومته الحرارية أكبر من ٢٠٠٠ م. قيمة المقاومة الحرارية لطوب الكروميت - المانيزيت تحت التحميل بحوالي ٢ كج/سم^٢ تختلف ما بين ١٥٣٠ م بالنسبة لطوب الخدمة العامة المرتبط كيمائيا إلي ١٦٠٠ م لطوب الخدمة العامة الحراري المحروق . المقاومة الحرارية تحت الحمل لهذا الطوب مناسبة لتبطين الأسقف في أفران - المجرمة المكشوفة (Open Haerth Furnaces) هي حوالي ١٧٠٠ م والتي هي ٣٠٠ م أعلا من ذلك لطوب السيليكا تحت ظروف التحميل المشابهة .
- الإستخدام : يستخدم طوب الكروميت - المانيزيت علي نطاق واسع في أفران الجمرمة المكشوفة الحامضية أو القاعدية في عمل المجرمة (Hearth) ، الأسقف ، الحوائط الجانبية ، المنافذ والفتحات الجانبية - كما يستخدم علي نطاق واسع في صناعة الصلب . فهو يستخدم في التبطين الداخلي في أفران صناعة الصلب القاعدية (مثل المحولات) والحوائط الجانبية في أحواض التشريب أو النقع (Soaking Pits) المستخدمة في تسخين كتل الحديد الخام

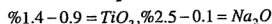
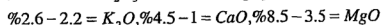
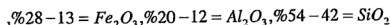
(Ingots) . ولكن يتم تجنب الحراريةات المحتوية علي الكروم في نوعية الأفران المنتجة للصلب حيث النطاق كمية صغيرة من الكروم بواسطة الصلب يجعله غير مطابق للمواصفات .

يستخدم طوب الكروم - الماغنيزيت كذلك في محولات النحاس (Copper Converters) وأفران صهر النحاس ، وفي تبطين أفران الحث الكهربى ، والحوائط الجانبية لأفران القوس الكهربى ، محارق أحواض الزجاج والأفران المستخدمة في صهر وإعادة صهر وتنقية الألومنيوم ، سبائك الألومنيوم. في أفران المجرمة المكشوفة القاعدية . يستخدم طوب الكروم - الماغنيزيت في بناء الحوائط الأمامية والخلفية من سقف الباب حتي السقف ، كذلك حوائط كوبري الهواء والغاز تحت الممر المنحدر (Ramp) جملة الحائط إلي مستوي منصة الشغل ثم إلي سقف جيب الخبث ...إلخ .

حراريةات الكربون / الجرافيت : (Carbon Graphite Refractories)

الجرافيت هو الشكل البللوري للكربون ورواسبه الطبيعية تكون مخلوطة بمواد كلسمية وسيليكونية . الراسب الطبيعي يعرف بالبلمباجو (Plumbago) استخدم الكوك كبديل رخيص للجرافيت ولكنه ليس كافيا مثله .

يوجد الكربون في الطبيعة في الشكل البللوري والغير بللوري . في الجرافيت تكون ذرات الكربون منظمه في إطار سداسي . الجرافيت أقل عرضة للأكسدة مقارنة للأشكال الأخرى للكربون الغير بللوري بسبب انخفاض مساميته (أقل من ٥ %) . يتراوح محتوى الجرافيت من الرماد ما بين ٧,٥ - ١٢,٥ % . مكونات الجرافيت كالآتي تقريبا :



مادة الربط لحراريةات الكربون (المصنوعة من الكوك أو الجرافيت) هي عادة

القطران أو القار (الخالي من الأمونيا والزيوت الخفيفة) ولكن لين الجير ، الطفل الحراري ، سيليكات الصوديوم ... إلخ يمكن كذلك استخدامها . لإنتاج طوب الكربون الحراري يتم طحن الكوك المحتوي علي أقل من ٨% رماد إلي ١-٢ ملمتر تم تخزينه في مكان جاف . يتم نشر حوالي ١٠ كج من مسحوق الكوك علي أرض نظيفة ثم يصب القار أو الزيت الساخن عليه . يتم الخلط بالكواريك سريعا للحصول علي خليط متجانس مع تجنب تكوين كتل . يتم بعد ذلك تشكيل الخليط في قوالب من الخشب أو من الحديد والتي يتم تزييتها قبل الإستخدام . بعد إزالة المادة الزائدة (بسبخ حديد ساخن) ، يتم تبريده ثم رفع القالب إلي أعلا تاركا الطوب علي طاولة القاعدة . يتم تبريد الطوب في غرف مهواه . لا يتم تعريض الطوب لضوء الشمس الذي يعمل على ليونه القار ويعيق التصلب للأشكال .

لأنتاج منتجات فائقة ، يتم معالجة الجرافيت بعد الطحن بحامض الهيدروكلوريك لإزالة الملوثات المعدنية . يتم الخلط مع مادة ربط مثل الطفل اللدن ، سيليكات الصوديوم أو القار ثم التشكيل . طوب الكربون المستخدم كثيرا يصنع من الكوك ذو المحتوي المنخفض جدا من الرماد ويستخدم القار كمادة ربط . أثناء الحرق ، يتم تقليل الالتصاق بين الهواء والطوب الحراري إلي أدني حد بملي الفراغ بين الطوب بخليط من الرمل ومسحوق الكوك .

حرق حراريات الكربون يتم بدون الالتصاق مع الهواء في فرن التيار السفلي المحكم ضد دخول الهواء . يتم تعبئة الطوب الجاري حرقه مع خليط من الرمل والكوك في دواليب الفرن لمنع تشويهها أثناء التسخين الأولي . في الفرن يتم التسخين الغير مباشر ويبطئ إلي ٢٥٠ م التي عندها يتحول القار إلي الكوك والحراريات تجمد . أخيرا يتم زيادة الحرارة إلي ١٣٠٠ م واستمرارها لمدة ٥٠ - ٧٠ ساعة التي عندها يتم إكمال حرق الطوب . يتم عندئذ تبريد الفرن ببطئ شديد حتي درجة حرارة الغرفة ثم يتم فتح الفرن وتفريغه . زمن التبريد يساوي تقريبا زمن التسخين . إجمالي الدورة السمنية من الحرق الأولي إلي فتح الفرن هي حوالي ٢٠٠ - ٢٢٠ ساعة. الحراريةات

التي بها عيوب يتم طحنها وإعادة إستخدامها .

الطفلة الحرارية التي يتم تغطيتها بالقار أو رواسب الكربون عليها ، في ظروف محكمة تستخدم كذلك - الكربون يزيد من مقاومتها ويزيد من عمر استخدامها .

الأشكال الحرارية من خليط الجرافيت والطفل الحراري يتم بنفس الطريقة كما في الكوك ، ولكن ، يتم تنقية الجرافيت (لإزالة المراد السيليكونية والكلسية) قبل الإستخدام بالطحن والغسيل أو بطفو الزبد والرغاوي .

الجرافيت المنقي يتم عندئذ خلطه مع الطفل الحراري بنسبة ١٥ - ٢٥ % .

طوب الطفل الحراري الجرافيتي يتم إنتاجه بنقع الطفل الحراري في القار الساخن .

القار المنصهر يملأ مسام هذه الحراريات . الحراريات التي تم نقعها في القار عند التسخين البطيء إلى ٢٥٠°م في جو إختزال تتحول إلى الجرافيتية بترسيب الكربون علي أسطح المسام بقدر حدوث الإختراق داخل الطوب .

الخواص: الجرافيت لا ينصهر ويتسامي (Sublimes) عند ٣٦٠٠°م وهو لا يتأثر بأي نوع من الخبث أو كيماويات ولكن في وجود الأكسجين عند درجات الحرارة العالية فإنه يتأكسد . وهو مقاوم للصدمات الحرارية وله قدرة توصيل حراري وكهربي عالية

مسامية الكربون الحراري تتراوح ما بين ٢٠ إلى ٢٥% والوزن النوعي من ١,٥ إلى ١,٩ . ولونه رمادي فاتح ويعطي صوت رنين عند التصادم.

المقاومة الحرارية لهذا الطوب عالية جدا ولا يحدث لها أي تغير في الشكل تحت التحميل حتي ٢كج/سم^٢ وعند ١٧٥٠°م . إجهاد الكسر علي البارد لحراريات الكربون هي حوالي ٣٥٠كج/سم^٢.

نظرا لأن كتل الكربون لا تبتل بالمصهور، فإن استخدامها في فرن المجرمة المكشوفة يمنع تكون القشور المعدنية في حالة تبريد فرن المجرمة المكشوفة وبذا يساعد في تنظيم عمله . ولكن حراريات الكربون تتأكسد وتحترق عند التعرض للهواء مع التسخين .

الإستخدام:

الطوب الكربوني له أكبر استخدام في تبطين المجرى (Hearth) ومستوق الفرن العالي بين قطرية الأكبر والأصغر (Bosh) ، كما يستخدم كذلك في أفران أخرى ومعدات أخرى حيث تكون درجة الحرارة مرتفعة والجو غير مؤكسد .

كسك الكربون الحرارى تستخدم فى تبطين مجرى الفرن العالى (بسبب قدرتها على تحمل الحرارة والأحمال والعدوانية الكيماوية أثناء صنع الحديد)، وحوائط مستوق الفرن العالى ، وكذلك المجمرات البديلة . بسبب وجود جو إختزالى فى الفرن العالى فإن عمر الخمة للكربون الحرارى يمتد بسبب إنخفاض أكسدة المعدن إلى إننى حد فى هذا الفرن . التوصيل الحرارى العالى للبطانة من الكربون تساعد فى سهولة التحكم فى درجات الحرارة فى الجزء السفلى من الفرن العالى . كذلك يتم تبطين مسارات الحديد والخبث بالكربون الحرارى والذي يعمل بأبعاد دقيقة نظرا لأنه ينكمش بدرجة صغيرة جدا . تستخدم الأشكال المموجة (Corrugated) لتوفير وصلات قوية غير مسامية والتي تمنع إختراق المعدن ، الخبث ، تفكك الوصلات وطفو كتل الكربون .

الطوب الحرارى الجرافيتي (الذي ينتج بنقع الطل الحرارى فى القار الساخن عند ١٥٠٠م لمدة ٢٤ ساعة يليه التسخين البطئ فى جو إختزالى حتى ٢٥٠٠م بما ينتج عنه التحول الجرافيتي (Graphitization) . مفيد فى الأماكن الأكثر عرضة لعدوانية الخبث (إما بسبب درجة الحرارة العالية للسبك أو بسبب المكون الكيماوي للمعدن ، الخبث) مثل السدادات ، الفتحات الصغيرة (Nozzlas)، ومغرفة المعدن المنصهر . تستخدم الكربون كمخلوط لذلك مع القار لبناء الخلايا الإليكترولتيية مثل خاصية إختزال الألومنيوم . طوب الكربون الحرارى المنقوع فى القار له مقاومة جيدة للأكسدة وعدوانية الخبث ، إجهاد الضغط العالى ، إنخفاض المسامية ونفاذية الغاز (بسبب قفل المسام) مقارنة بذلك الذي لا يتم سقيه فى القار .

استخدام التبطین بدمك الكربون فى التعبئة يؤكد انتقال حرارى أفضل لأسطح مياه التبريد فى الأفران العالية بما ينتج عنه إنخفاض درجة حرارة الوجه الساخن

للحراري. يستخدم الكوك مع رابط من القار كمادة ملئ في الفرن العالي مابين التبطين بالكربون وألواح التبريد وكذلك مابين التبطين بالطفل الحراري وغلاف الفرن الخارجي .

تستخدم بوتقات الجرافيت ذات الأحجام المختلفة (ذات مسامية ظاهرية من ٣٠ - ٤٠ % وكثافة كلية من ١,٤ إلى ١,٥ جرام/سم^٣ طبقا للحجم) لصهر الحديد الزهر ، الألومنيوم ، النحاس ، النحاس الأصفر إلخ .

نوع آخر جديد لحراريات الكربون الذي يسمى حراريات السيراميك الجرافيتي مثل جرافيت المجنيزيا وجرافيت الألومنيا تستخدم في عمليات صناعة الصلب بسبب مقاومتها العالية للتشقق وتأثير الخبث القلوي عند درجات الحرارة العالية مع إنخفاض استهلاك حراري معين .

طوب الألومنيا الجرافيتي يستخدم في البوابة المنزلقة ونظم السبك المستمر في شكل أنابيب صب ، ألواح منزلقة وفتحات صغيرة إلخ .المجنيزيا الجرافيتي هي حراريات لها مسامية أقل من ١٠% وهي حاليا تستبدل حراريات الألومنيا سيليكيت لتبطين مغارف الصلب المنصهر المستخدمة كأواني المعالجة الثانية لإنتاج الصلب عالي الجودة . .

مكونات طوب المجنيزيا الجرافيتية الحرارية هي $C = 20-2\%$ ، $CaO = 2.2-2.4\%$ ، $SiO_2 = 0.7-1.5\%$ ، $Fe_2O_3, Al_2O_3 = 0.3-0.4\%$

بعد التلويين مابين ٣٢٣ - ٦٣٣ كج/سم^٢ . الكثافة الكلية بعد التكويك والتلدين هي من ٢,٧٦ - ٢,٩٩ ، ٢,٨ - ٣,٠٤ علي التوالي . طوب المجنيزيا الجرافيتي يستخدم كثيرا في أفران القوس الكهربائي عالية الطاقة وأفران الأكسجين القلوية بسبب نقطة الانصهار العالية ومقاومة الخبث القلوي .

حراريات المجنيزيت كروم (Magnesite Chrome Refractones)

التصنيع :

طوب المجنيزيت الكروم يصنع من خليط من خامات المجنيزيت والكروم ، يكون

المجنيزيت هو النسبة الغالبة في الخليط - تستخدم الطفلة أو القار أو مادة عضوية كمادة رباط (مثال العسل الأسود) . أدنى نسبة من الماغنيزيت (Mgo) ، الكروميت (Cr_2O_3) في الخليط تختلف ما بين ٥٥% ، ٦% (في حالة الطوب الحزمة العامة المحروق أو بمادة الربط الكيماوية) إلي ٦٥% و ١٠% (في حالة الحراريات ذات الرباط الكيماوي لتبطين الأسقف) . السيليكا في حراريات المجنيزيت كروم ويسمي كذلك (Mag - Chrome Bricks) يجب أن تكون أقل من ٥% نظرا لأنها تقلل من المقاومة الحرارية . في حالة طوب المجنيزيت - الكروم المحروق ، يتم الرباط مع الحرق للقوالب الحرارية التي تم تشكيلها ، بينما في حالة الربط الكيماوي للطوب ، فإن مادة الربط تقوم برباط الحبيبات والصلابة بسبب التفاعل الكيماوي ما بين المادة الحرارية ومادة الرباط . استخدام مواد الرباط (مثل Na_2CO_3 ، $MgSO_4$ ، K_2CO_3 ، $MgCl_2$ ، $BaSO_4$ ، H_2SO_4 ، سيليكات الصوديوم ، الكرومات ، الأورثوسيليكيت) وهذه لها أدنى حدود لتجنب تأثيرها السلبي على خواص أخرى للطوب الحراري .

نموذج لمكونات كتلة المجنيزيات كروم (والتي تستخدم بعد النضج (Aging) لتبطين أفران الحث الكبري المفتوحة التي تنتج سبائك شديدة التماسك) ، هي كالآتي :

$MgO = 56\%$ ، $Cr_2O_3 = 14\%$ ، $Fe_2O_3 = 6.5\%$

$Al_2O_3 = 4.5\%$ ، $SiO_2 = 5\%$ ، $FeO = 1\%$

$CaO = 3\%$ ، $MnO = 0.5\%$ ، $TiO_2 = 0.25\%$

$K_2O = 0.25\%$

التجاوز في الحجم هو $\pm 10\%$ يسمح به في طوب المجنيزيت - الكروم لتغطية التغيرات في الأبعاد بسبب الإنكماش أو الإعوجاج أثناء التصنيع .

الخواص:

طوب المجنيزيت - الكروم له تقريبا نفس الخواص لطوب الكروم - الماغنيزيت .

المسامية (Porosity):

المسامية الظاهرة لطوب المجنيزيت - الكروم تتراوح ما بين ٢٣% (لطوب الربط الكيماوي لتبطين الأسقف) إلى ٢٤% (للطوب الحزمة العامة بالربط الكيماوي أو بالحرق) .

المقاومة الحرارية تحت الأحمال :

أدنى مقاومة حرارية تحت الأحمال هي ٢ كجرام/سم² لهذا الطوب عند درجة حرارة ١٥٥٠ م°.

مقاومة التشظي بالجسيمات (Spalling Resistance):

طوب المجنيزيت - الكروم له مقاومة تشظي أفضل من طوب الكروم - المجنيزيت ، ولذلك فإنه استخدم بدلا من طوب السيليكا لتبطين الأسقف لأفران المجرمة المكشوف (Open Hearth Furnance) وكذلك طوب الأفران الأخرى حيث يعطي عمر أطول ودرجة حرارة استخدام أعلا . هذا الطوب يتحمل ٢٠ دورة حرارية علي الأقل .

إجهاد الكسر علي البارد :

يتراوح إجهاد الكسر علي البارد لطوب المجنيزيت - الكروم ما بين ٢٥٠ كجرام/سم² (لطوب الحزمة العامة المحروق إلي ٤٥٠ كج/سم² لطوب الربط الكيماوي المستخدم في تبطين أسقف الأفران .

التغير في الطول:

التغير في الطول لهذا الطوب من نوع الحزمة العامة عند ١٦٠٠ م° لمدة ساعتين يتراوح عند أقصاه ما بين 0.5 % (للطوب المحروق) إلي ١% لطوب الربط الكيماوي

مقاومة فعل الخبث : (Resistance Toslag Action):

طوب المجنيزيت - الكروم له مقاومة ممتازة للخبث القلوي وأكسيد الحديد،

ولكن، وجود زيادة من F_2O في الخبث يسبب إتلافه وذلك يسبب النمو علي حساب التمدد الذي يحدث لأن F_2O يمكن أن تمتص في طول الحبيبات الخشنة بسبب الخاصية الشعرية وذلك قبل التلف الحقيقي للحراريات . الحراريات ذات المحتوى العالي من F_2O يمكن كذلك أن تنمو بسبب ترسيب الكربون وبذا تنفتت بسبب إنخفاض مقاومة التشنجي (Spalling) والتشقق والذي تزداد بسبب وجود كميات عالية من CaO . ولذلك فإن طوب المجنيزيت - الكروم يجب أن يكون محتواه منخفض من CaO, Fe_2O_3 وأن يكون استخدامه فقط للخبث القلوي المحتوي علي نسبة قليلة من F_2O .

الوزن النوعي العالي والمعامل العالي للتمدد الحراري يجعل الأفران المقوسة (Arched Furnaces) ذات الأسقف المبطنه لطوب المجنيزيت - الكروم لها حساسية لارتفاع وإنخفاض والتغيرات في درجة الحرارة منتجة تشققات وبذا يحد من استخدامها تحت ظروف التغيرات في درجات الحرارة . لذلك فإن مثل هذه الأفران تظل باستمرار تحت التسخين بالغاز حتي في حالة إعداد مجمرة الفرن وأي إصلاحات أخرى بين عمليات سحب المصهور وعملية إعادة التغذية بشحنة الخام .

الإستخدام :

يستخدم طوب المجنيزيت - الكروم في تبطين السقف المائل لمآخذ سحب الهواء ، أسقف جيوب الخبث ، أسقف البوابات ، مآخذ سحب الغاز ، الحواط الأمامية والخلفية، مناطق الحرق ... إلخ في أفران المجرمة المكشوفة. بسبب المقاومة العالية للتآكل بفعل أكسيد الحديد ، فإن هذا الطوب يستخدم في أحواض السقي (Soaking Pits) ، أفران إعادة التسخين ، والأفران الكهربائية لصناعة الصلب ، وأفران الأسمنت ، وتبطين أسقف الأفران العاكس (Reverberatory furnaces) المستخدمة في صهر النحاس .

الطوب المجنيزيت - الكروم بالربط المباشر (المحتوي علي الكروميت وعلي المغنيسيا الطبيعية - Periclase) تستخدم في تبطين معدات سحب الغازات من الصلب بالتفريغ .

استخدام آخر لطوب المجنيزيت - الكروم هو في الشكل المغلف بالمعدن (Metal Case). هذه الحراريات المغلفة بالمعدن ، والتي لها قوة ميكانيكية عالية بما تنقل من مشاكل التداول والكسر تستخدم كثيرا في إنشاء السقف المعلق لأفران المجرمة المكشوفة (Open Hearth) وكذلك في الأفران الكهربائية لصهر الصلب . الطوب بالغلاف المعدني (أي المحروق أو الرباط الكيماوي في غلاف من شرائح الصلب الكربوني) عند الإستخدام في بناء سقف الفرن يتم وضعه بالتبادل مع طوب حراري غير مغلف في المعدن . الغلاف من الصلب مع التسخين يتأكسد مكونا شعيرات أو فتل (Spinal) من الفيرومغنسيوم (عند التفاعل مع الكروميت والمجنيزيت) التي تتصهر عند ١٦٠٠ م بما ينتج عنه رباط للطوب وتكون سطح غير مسامي له مقاومة عالية لتآكل الخبث المنصهر وكذلك للغازات المحملة بالأتربة . يتم الحرص من التمدد مع التسخين وذلك بالإنحناء البسيط لأغلفة الصلب وبذا يحسن من المقاومة ضد التشطي لهذا الطوب .

تبطّن أفران المجرمة المكشوفة باستخدام المجنيزيت والكروميت الملبد ومركبات الملاط الأسمنتي (Guniting) المحتوية علي السيليكا كمادة رابطة تساعد في خفض الفترة الزمنية للتوقف للأصلاح وزيادة عمر الخدمة للسقف .

حراريات الزركونيا (Zirconia Refractories)

عادة تصنف حراريات الزركونيا كحراريات متعادلة ولكنها ليست مقاومة بدرجة جيدة للخبث الحامضي ولذلك فإنها علي الخط العريض مابين الحراريات المتعادلة والقاعدية . المصدر الرئيسي لخام الزركونيا هو ZrO_2 (Beddeleyite) . يتغير بناؤه الداخلي مع ارتفاع درجات الحرارة فعند ١٠٠٠ م يكون البناء أحادي الميل (Monoclinic) ، ويكون البناء مثلثي (Trigonal) عند درجة حرارة أعلا من ١٩٠٠ م . وجود الجير (Lime) أو أكسيد المغنسيوم يحوله إلي بناء مكعب ثابت ولكنه يقلل من القدرة علي المقاومة الحرارية للطوب . الزركونيات الثابت المكعب (Cubic Stable Zirconia) الذي يتم إعادته بخلط الزركونيا مع ٣% من MgO أو ٥% من Cao والتسخين

إلى ١٧٠٠°م بعد التكسير والطحن والفرز يتم خلطه مع مادة الربط مثل H_3PO_4 ، C_6O ، زيروكس ثنائي أكسيد المنجنيز في خلاطات طرفيه (Edge Runners) . يتم عندئذ تشكيل الخليط بالطريقة اليدوية ، ثم الضغط علي البارد عند ٥٦٠ كجرام/سم^٢ أو بالقولبة المنزلقة (Slip Casting) . درجة حرارة الحرق للطوب يتراوح ما بين ١٥٥٠ إلى ١٧٠٠°م طبقا للمطلوب للمنتج .

المادة الخام ل ZrO_2 الذي يوجد في شكل خامات (Zir Conite) ، Zirconia ، و Zircon تحدث تغيرات حجمية للخام مع التسخين ، والتبريد ويتم التثبيت بإضافة C_6D / Mgo ثم الحرق عند ١٧٠٠°م . مادة الربط تكون الزركونيا العزوبة (Colloidal Zirconia) (يتم تحضيرها بتخفيف محلول نترات الزركونيوم ثم أخذ المتبقي في المحلول ثابتا ثم التجفيف) . يمكن كذلك إضافة الألومينا كمادة ربط رخيصة التكاليف . ثم عندئذ تشكيل الخليط في شكل قوالب ، التجفيف البطيء ثم الحرق عند ١٧٥٠°م أو حتي عند درجة حرارة أعلا لطوب أفضل .

الخواص :

يمكن استخدام طوب الزركونيا حتي درجة حرارة ٢٠٠٠°م ، بالإضافة أن الطوب المعد خصيصا يمكن أن يعمل عند درجة حرارة حتي ٢٦٠٠°م . المقاومة الحرارية تحت التحميل هي عند درجة حرارة ١٦٠٠°م وعند التحميل ٣،٥ كجرام/سم^٢ . هذه تقاوم الخشب القلوي ولكنها لا تكفي للإستخدام مع الخشب الحامضي وهو مقاوم للصدمات الحرارية .

الزركونيا النقية (نقطة الإنصهار عند ٢٦٧٧°م) تتفاعل مع H_2 ، N_2 عند درجة حرارة أعلا من ٢٢٠٠°م ولكن عند درجة حرارة أقل يكون ثابت في كلا من المجال المؤكسد والمختزل . بسبب انخفاض درجة التوصيل الحراري حتي عند درجات الحرارة العالية ، فإنه مفيد كمادة عزل . ولكن بسبب توصيلة الكهربائي العالي عند درجة الحرارة العالية ، فإنه يستخدم كموصل في أفران الحث ذات التردد العالي .

له درجة مقاومة للتقشف منخفضة بسبب حساسية الزركونيا لتغيرات في بنائه عند التسخين بما يحد من استخدامه في الأماكن حيث توجد تغيرات كثيرة في درجات الحرارة . مواد السيراميك المصنوعة من الزركونيا - الهافيا (نسبة جزيئات الزركونيا ٦٠%، $HF O_2$ ٤٠%) المحلول الصلب له ضغط بخار منخفض وقوة ممتازة ومقاومة جيدة للتقشف .

الإستخدام:

طوب الزركونيا مكلف جدا ويستخدم فقط عندما تكون درجة الحرارة عالية جدا وفي الأفران الكهربائية ذات التردد العالي .
الزركونيا لا تتفاعل مع أي معدن (عدا التيتانيوم) ولذا فإنه يستخدم في الأوعية المستخدمة في حرايات المعادن والسبائك عند درجات الحرارة العالية. يتم تصنيع الأدوات الصغيرة مثل طرف الموقد (Burner Tip) ، غلاف المزدوجة الحرارية (Sheath of Thermocouple) ، بوتقات الحرق (Crucibles) ، وقوارب الحرق بالصب المنزلق للزركونيا (Slipcasting). المادة الحرارية المستخدمة للثبوت (Nozzles) المستخدمة في الصب المستمر في مصانع الصلب تكون مصنوعة من الزركونيا . تستخدم الزركونيا كذلك في تبطين أفران السيراميك ذات درجة الحرارة العالية ، وكذلك طبقة التغطية الحرارية للمحركات النفاثة (Jet Engines) وفي صناعة البوتقات (Crucibles) ، الأفران المستخدمة في صهر المعادن الثمينة ، مواد الإنامييل ، الزجاج، الزجاج الخاص .. إلخ . تستخدم سيراميك الزركونيا - هافينا كبناء من الطوب (Tiles) لحمل السبائك ذات درجة حرارة الانصهار العالية حيث التسخين حتي درجة ٢٠٠٠ - ٢٣٠٠ °م .

حرايات الزركون (Zircon Refractory)

سيليكاات الزركونيوم (مركب حراري من الزركونيا) توجد في الطبيعة كخام الزركون . وهي تنتج كذلك بتسخين الزركونيا ذات البناء رباعي الزوايا (Teragonal)

مع السيليكا عند ١٤٠٠°م. الزركون ثابت حتي درجة حرارة ١٧٥٠°م ولكن عند درجة حرارة أعلا فإنه يتحلل منتجا الزركونيا وزجاج السيليكا أو (Cristobalite) والذي هو الشكل الثابت للسيليكا عند ١٤٤٠°م. يتم خلط الزركون ومسحوق السيليكا مع مادة الربط مثل سيليكات الصوديوم ، حامض الفوسفوريك .. إلخ ، إلي حالة العجينة المتماسكة حيث يتم تشكيله بالضغط إلي الشكل المطلوب . يستخدم كذلك الصب المنزلق لتشكيل حراريات الزركون والتي يتم تجفيفها ثم حرقها عند ١٦٠٠°م . المقاومة الحرارية للزركون هي ٢٠٠٠°م والمقاومة الحرارية تحت التحميل عند ٢ كج/سم^٢ هي ١٦٠٠°م . له مقاومة عالية للتآكل ومعامل تمدد منخفض . تستخدم حراريات الزركون في أفران إعادة الصهر للألومنيوم ذلك لأنها لا تتبل بمصهور الألومنيا . وهي تستخدم كذلك في الغلايات حيث توفر مقاومة عالية لعدوانية رماد الفحم والزيوت . النافورات (Nozzles) من الزركون تستخدم في السبك المستمر للصلب - كتل الزركون - الطفل لها معدل ممتاز من التليد والتآكل كما أن لها جهد انضغاط عالي . يجب تجنب استخدام حراريات الزركون ملتصقة مع أملاح الفوسفات ، أكسيد الحديد و الفلورسبار حيث أنها تتفاعل مع هذه المواد .

حراريات الماغنيزيت (Magnesite Refractorise)

حراريات الماغنيزيت هي من أهم الحرارية القاعدية ذات الإستخدام علي نطاق واسع . الماغنيزيت هو كربونات المغنسيوم ($MgCO_3$) ويوجد كرواسب طبيعية ، ولكن قبل استخدامه كمادة حرارية ، فإنه يجب تسخينه بشدة والمنتج هو MgO الذي يستخدم كمادة حرارية . الماغنيزيت الكثيف وذو مسامية منخفضة المحتوي علي حوالي ٦% Fe_2O_3 (للحصول علي ثبات الماغنيزيا عند درجات الحرارة المنخفضة) مناسب لصناعة الحرارية . يتم الحرق الجيد لخام الماغنيزيت في أفران دوارة أو في الأفران المهواه عند درجة حرارة ١٥٠٠ - ١٧٠٠°م (للحصول علي بللورات الماغنيزيا ، والتي تسمى - Periclase) ويتم طحن الكتل ذات الحجم ١١٠-١٣٠

تسخينها إلى ١٧٠٠°م حتي تمام التحلل (Decomposition). عندئذ لا يحدث أي إنكماش عند الإستخدام الحقيقي . وهو لا يمتص الماء أو ثاني أكسيد الكربون من الجو . لذلك فإنه من الماجنيزيت يمكن الحصول علي حوالي ٤٨% من الماجنيزيت المحروق (Dead Burnt) . الشكل المعدني أو البللوري لأكسيد المغنسيوم (درجة حرارة الإنصهار ٢٨٠٠°م) يسمى (Periclase). يستخدم طحن هذا البيركليز إلي الحجم المناسب والخلط مع الماجنيزيا الكاوية أو سائل الصرف للسلفيد (Sulphidelye) الناتج من مخلفات مصانع الورق) أو أكسيد الحديد كمادة ربط والطحن مع الماء ثم التشكيل في قوالب . يتم التسخين البطيء للطوب إلي ١٥٠٠°م ، والإستمرار عند درجة الحرارة هذه لمدة ٨ ساعات ثم التبريد البطيء . كذلك يصنع الطوب بالرباط الكيماوي والذي لا يحتاج إلي الحرق .

الخواص :

يمكن استخدام طوب الماجنيزيت حتي ٢٠٠٠°م بدون تحميل وحتى ١٥٠٠°م تحت تحميل ٣,٥ كجرام/سم². وهو قلوي بطبيعته ولكنه ليس قلوي مثل الدولوميت والتفاعل مع الطوب الحامضي الآخر ليس سريعا جدا ، لذلك فإنه يمكن استخدامه بالإتصال مع الطوب الحامضي ذو درجة الحموضة المنخفضة . طوب الماجنيزيت لا يمكنه مقاومة الصدمات الحرارية ، يفقد القوة عند درجة الحرارة العالية ولا يقاوم الاحتكاك . وللتغلب علي هذه العيوب ، فإن الطوب يمكن تعبئته وتغليفه في صناديق معدنية واستخدامه .

يتم حرق طوب الماجنيزيت في فرن من نوع غرفة الدفق السفلي (Down Draftchambre Typekiln) يشبه ذلك المستخدم في حرق طوب السيليكا أو فرن نفقي (Tummer) والذي يمكن من التحكم الأمثل عند درجة حرارة ١٦٠٠ - ١٨٠٠°م . درجة حرارة الحرق الأعلى تقلل من الإنكماش التالي للطوب . الأفران النفقية تتطلب دورة حرق قصيرة مقارنة بأفران الغرفة والتي تتطلب حوالي ١٢ يوم

لدورة الحريق ، أي الحرق والسقي لمدة ٨ ساعات ثم تبريد الطوب . تبريد الطوب يتم ببطئ شديد جدا . يتم عندئذ تخزين الطوب الصالح ، والتالف يتم إعادة استخدامه بعد التفسير والطحن . يجب أن يكون محتوى طوب الماغنيزيت في حدود الآتي :

MgO لا يقل عن 85% ، SiO_2 أقل من 5.5% ، CaO أقل من 2.5% ،

Al_2O_3 حوال 1% ، Fe_2O_3 = 6%

اللون:

يختلف لون طوب الماغنيزيت ما بين الرمادي إلي البني الغامق طبقا للمحتوي من الحديد . الطوب الخالي من الحديد والملوثات الأخرى يكون لونه أبيض .

الوزن النوعي والمسامية :

الوزن النوعي عالي (٣،٤ - ٣،٦) وذلك بسبب عملية الضغط العالي للتشكيل . وجود أكسيد الحديد يزيد من الوزن النوعي بينما السيليكا تخفزه . درجة الحرق ووجود الملوثات يؤثر كذلك علي الوزن النوعي . أقصى مسامية ظاهرية للطوب هي ٢٤% .

إجهاد الكسر علي البارد :

إجهاد الكسر علي البارد للطوب الذي تم ضغطه وتشكيله هيدروليكي لا يقل عن ٣٥٠ كجرام/سم^٢ ، بينما الطوب الذي تم تشكيله يدويا له قيم إجهاد كسر أقل .

المقاومة الحرارية تحت التحميل :

المقاومة الحرارية تحت التحميل لطوب الماغنيزيت من النوع الجيد هي حوالي ٢٠٠٠ م. الملوثات مثل Al_2O_3 , CaO , SiO_2 القلويات .. إلخ . تقلل من المقاومة الحرارية . المقاومة الحرارية تحت التحميل ٢ كجرام/سم^٢ هي حوالي ٢٠٠ م أعلا من ذلك لطوب الطفل الحراري حيث تتراوح ما بين 1525 م - 1575 م . طوب الماغنيزيت عادة لا يحدث له ترخيم (Sag) قريبا من نقطة الإنصهار ويظل ثابتا حتي حدوث الإنهيار مثل طوب السيليكا .

التوصيل الحراري والتوصيل الكهربائي :

نظرا لأن التوصيل الحراري لطوب المانيزيت ينخفض مع إرتفاع درجة الحرارة فإنه مفيد عند رفع واستمرار درجة الحرارة العالية . التوصيل الكهربائي لهذا الطوب يكون عاليا عند درجة حرارة مرتفعة حوالي 1500° م .

مقاومة التقشف الحراري : (Thermal Spalling Resistance)

طوب المانيزيت له مقاومة إحتكاك وتقشف حراري منخفضة لذلك فإنه لا يقاوم التغيرات الفجائية في درجة الحرارة وتفتت. حدود طوب المانيزيت يمكن خفضها بواسطة:

- الطحن الدقيق للمادة قبل الخلط باستخدام الضغط العالي الكافي عند ضغط وتشكيل الطوب
- خفض المحتوي من أكسيد الحديد في الطوب حيث أن ذلك يوفر مقاومة أفضل للصدمات الحرارية مقارنة بالمحتوي العالي من الحديد .
- حرق المانيزيت عند درجة الحرارة العالية لفترة أطول لتأكيد تمام التحول إلى البيركلز (Periclase) .

مقاومة عدوانية الخبث :

نظرا لطبيعة القلوية فإن طوب المانيزيت يقاوم الخبث القلوي الغني بالجير وأكسيد الحديد . هذا الطوب لا يستخدم ملتصقا مع الخبث الحامضي . الطوب ذو المسامية العالية والأسطح الخشبية يكون معرضا بدرجة أكبر لعدوانية الخبث . ولكن الطوب ذو الكثافة العالية له مقاومة جيدة للخبث .

الإستخدامات:

تستخدم حراريات المانيزيت علي نطاق واسع في صناعة الحديد والصلب في شكل طوب مثل حبيبات المانيزيت (بقطر حوال ١سم). يستخدم حبيبات المانيزيت هذه لعمل قاع الأفران القاعدية . تستخدم الطوب لعمل الأفران

القاعدية ، خليط المعدن الساخن ، أحواض السقي (Soaking) .. إلخ .
يستخدم طوب الماغنيزيت في تلك الأجزاء من الفرن التي تتطلب مقاومة عدوانية الخبث القلوي والتي لا تكون معرضة للتغيرات في درجة الحرارة . كذلك يستخدم هذا الطوب في الأفران المستخدمة في رفع واستمرار الحرارة المرتفعة . ولكن العامل الذي يحد من استخدام طوب الماغنيزيت هي المقاومة المنخفضة للتشقق (Spalling) ، انخفاض المقاومة الحرارية تحت التحميل ، التوصيل الحراري العالي عند درجات الحرارة العالية ، التكلفة العالية .

معظم استخدامات طوب الماغنيزيت هي أفران الجمرة المكشوفة (Open Hearth)، خلطات المعدن الساخن (كتل الحديد الخام) والقوس الكهربائي ، أفران صب الصلب الأخرى. تستخدم هذه الأنواع من الطوب كذلك في السفن وأفران التنقية للذهب والفضة والبلاتين . محولات النحاس (Copper Converters) وأفران تنقية بالذهب ، أفران صهر وتنقية النيكل والرصاص والأنتيموني وكذلك أفران الصهر للمعادن والسبائك الغير حديدية مثل (Cupro-Nickel) هذه تستخدم طوب الماغنيزيت . رغم تكلفتها العالية ، فإن هذا الطوب مفضل في تبطين المناطق شديدة السخونة لأفران الجير والأسمنت بسبب المقاومة الزائدة للتفاعل الكيماوي مع الكالكر وأكسيد الكالسيوم الساخن .

بوتقات فرن الحث الكهربائي (المستخدمة في صهر السبائك الحديدية والغير حديدية) باستخدام مادة الربط من الطول المنصهر للمجنيزيا (Clay Bonded Fused Magnesia) .

حراريات الماغنيزيت ذات الغلاف المعدني (Metalcased) تستخدم في كل من أفران الجمرة المكشوفة والأفران الكهربائية لعمل الصلب . الغلاف من الصلب مع التسخين فإنه يلين ويلتحم معا منتجا تبطين أحادي بأدني فائدية بما يحقق حسن الأداء . السقي أو الربط للمجنيزيت بالقار يستخدم في محولات الأكسجين حيث درجة الحرارة أعلا من 1610°م أو حيث يكون السبك مستمر للصلب ، يستخدم البيركلز (Mgo) المنصهر كمادة عزل كهربائي . تستخدم عجينة الماغنيزيت لإنتاج الفتحات الضيقة

لصب (Teeming Nozzles) الصلب والتي تصنع بالضغط بدون حرق - تستخدم للصب السريع للصلب من مغارف نقل الصلب (Ladles) ذات السعة الكبيرة .

تصنيع الألواح والكمرات للبوابات المنزقة (المستخدمة في صب الصلب) باستخدام البيركليز (Mgo) المتشرب بالبكاليت والذي له مقاومة عالية للحرارة والبري وقوة عالية . كذلك يستخدم مصهور (Mgo) كألواح في البوابات المنزقة .

تبطّن محولات النحاس وقيعان أحواض السقي يتم باستخدام طوب الماغنيزيت بينما الإصلاح والإنشاء لقاع فرن الجمره المكشوفة يتم باستخدام حبيبات صغيرة (Peasize) من الماغنيزيت المحروق جيدا .

السدادات المثقبة والكتل المستخدمة في نفخ الصلب المصهور بالغازات الخاملة تصنع من مادة مركبة من بيركليز والكورندم. ممرات الغاز إلى الفرن تستخدم في معالجة الصلب الكربوني بسحب الغازات لأزالة الكربنة (Decarbonising) .

طوب الماغنيزيت مع طبقات العمل من البيركليز مع إضافة الألومنيا هو مادة جيدة للسبك بدون سداة في وحدات السبك المستمر .

حراريات الدولوميت : (Dolomite Refractories)

الدولوميت الذي يمثل بالمعادلة $(CaCO_3.MgCO_3)$ عند الحرق (التحميص) ينتج (Cao , Mgo) . صعوبة استخدامه هي أن cao يمتص الماء وثاني أكسيد الكربون عند درجة الحرارة العادية وبذا يسبب تفتت الطوب . يمكن منع ذلك إما بتغطية الطوب بالقار بحيث أنه عند التخزين يتم تجنب الالتصاق مع الماء أو مع ثاني أكسيد الكربون، أو التثبيت (Stabilized) يخلط $(MgO.SiO_2)$ المسمى (Serpentine) مع الدولوميت والتحميص ، حيث يتم إنتاج داي أو تراي كالسسيوم سيليكيت والذي لا يمتص الماء أو ثاني أكسيد الكربون . بعد التحميص يتم الخلط مع الماء ، رابط السيليكا وعمل الطوب . يتم تجفيف الطوب والحرق عند 1500°م لمدة يوم واحد .

نظريا يحتوي الدولوميت علي حوالي ٣٠,٥ % Cao ، ٢١,٨ % MgO ، ٤٧,٧ % CO_2 . ولكن الدولوميت ، المرتبط مع الكالسيت يمكن أن يحتوي علي نسبة أعلا من Cao . الدولوميت المثالي المستخدم في الطوب الحراري يجب أن يحتوي علي ٤٥,٦ % جزئ من كربونات المغنسيوم ، ٥٤,٤ % جزئ من كربونات الكالسيوم ، كما يجب أن يكون صلبا ومدمجا له مظهر متجانس محتويا علي القليل جدا من الحديد ، السيليكا ، الألومينا نظرا لأن هذه تقلل من المقاومة الحرارية لطوب الدولوميت .

يتم الحرق الستام للدولوميت في فرن دوار عمودي (Rotary Shaftkiln) عند 1600°م في وجود بعض من السيربنتين (Serpentine) والذي يعمل علي تثبيت الدولوميت (السيربنتين هو سيليكات المغنسيوم المائية) . المحتوي من MgO ، Cao في الدولوميت المحروق جيدا هو حوالي ٤٢ % ، ٤٨ % علي التوالي . حتي أن الدولوميت المحروق جيدا فإنه شره المياه بطبيعته . ولذلك لمنع تميؤه ، فإنه يتم تغطية حراريات الدولوميت بالشمع أو بالقار بعد الحرق والتبريد مباشرة . يتم تخزين هذا الطوب في غرفة مكيفة عند درجة حرارة منخفضة ورطوبة مناسبة . الأفران التي يتم تبطينها بطوب الدولوميت المغطى بالشمع أو بالقار وبمجرد تسخين الفرن ، فإنه لا يتم تبريده إلي درجة حرارة الجو ، وإلا فإن بطانة الفرن سوف تنفثت بسبب التميؤ .

منع التميؤ والثبات للدولوميت :

يتم الحد من نشاط الدولوميت بتحويله إلي السيليكات أو إلي مركب آخر له درجة حرارة إنصهار عالية وذلك لمنع تميؤه . بسبب انخفاض نقطة الإنصهار (1540°م) للمونوكالسيوم سيليكيت فإن تحويله إلي الداوي أو التراي كالسيوم سيليكيت يكون مفضلا نظرا لأن نقطة انصهار مرتفعة وهي 2130°م ، ١٩٤٠°م بالتتالي. بخلاف الأشكال البلورية المتعددة (Polymorphic) لسيليكات الكالسيوم α ، β ، γ ، فإن الشكل α يكون ثابتا عند أعلا من ١٤١٠°م ، الشكل β ما بين ٦٧٥ ، ١٤١٠°م ، الشكل γ عند أقل من ٦٧٥°م . تكون الشكل γ (جاما) يصاحبه زيادة في الحجم ١٠% حيث يحدث الانفجار ومن ثم تنفثت للمادة . إضافة (Fe_2O_3) بحد أقصى ٤% إلي

الدولوميت يمنع تكون البلورات Y (جاما) من الداي كالسيوم سيليكيت . إضافة الفوسفات (Phosphates) أو البورون يعمل كذلك علي تثبيت الدولوميت .

تحميص الدولوميت : (Calcination of Dolomite):

الدولوميت والسيربنتين (Serpentine - $MgO, 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) يتم خلطهم بالنسب المناسبة ثم الطحن في مطحنة الكور مع كمية قليلة من الماء. يتم بعد ذلك تحميص الخليط المطحون في فرن دوار (عدد اللفات ٠,٦ إلي ٠,٨ لفة في الدقيقة) عند ١٦٠٠ م لمدة زمنية كافية لإتمام تفاعل التحول . إجمالي الوقت للتحميص والتبريد يمكن أن يكون حوالي ٢,٥ ساعة . تحميص الدولوميت مع السيربنتين لا يترك Cao حر ولكن ينتج التراي كالسيوم سيليكيت والبيركليز (MgO) الذي يكون خليط حراري جيد جدا . مع زيادة درجة التحميص فإنه يتم أولا التخلص من الماء ،

CO_2 ثم تكون التراي كالسيوم سيليكيت مع بعض البيركليز والزجاج أي SiO_2 (طبقا لكمية السيليكا الزائدة) الكلنكر (Clinker) المتكون ذو الحبيبات الكبيرة مع التتحميص يتم تبريده وتكسيره وطحنه . النسبة المطلوبة من كتلة الدولميت المطحونه والمحروقة جيدا ذات حبيبات من ١ - ٣ ملمتر ، من ٢,٠ إلي ١ ملمتر ، الحبيبات الدقيقة أقل من ٢,٠ ملمتر هي عادة ٥٥ - ٥٧ % ، ١٥ - ٢٠ % ، ٢٠ - ٤٠ % علي التوالي .

صناعة طوب الدولوميت الحراري :

يتم خلط الدولوميت المحروق جيدا بالتدرج المناسب للحبيبات مع مادة الربط و ٤ % ماء إلي الكتلة الشبه جافة . مواد الربط لحراريات الدولوميت تشمل لبن الجير ، القار ، سيليكات المغنسيوم ، الجير ، البلاستيك ، الخبث القاعدي ، كلوريد المغنسيوم .. إلخ . نظرا لأن وجود أو إضافة الطفلة ينتج عنه تكون الأورثو - سيليكيت والذي يصاحبه بزيادة حجمه حوالي ١٠ % لذلك فإن وجوده في الخليط يتم تجنبه دائما . يتم عندئذ تشكيل الخليط إلي الشكل المطلوب باستخدام الضغط الهيدروليكي باستخدام

ضغط حوالي ٧٠٠ كجم/سم² لإنتاج الطوب القوي . يتم بعد ذلك تجفيف الطوب في تيار من الهواء النظيف الجاف عند أقل من ٦٠ م³ لخفض التشقق . يتم عندئذ حرق الطوب في فرن السحب السفلي (Down Draught) بالتسخين البطيء أولاً للوصول إلى ٤٠٠ م³ في ٢٠ - ٢٥ ساعة وانتهاء الحرق عند ١٢٠٠ م³. يسبب الانخفاض النسبي لدرجة حرارة الحرق والتي هي ١٢٠٠ م³ (مقارنة بدرجة حرارة ١٤٥٠ م³ السابقة) فإن الطوب المنتج يكون من نوعية غير جيدة . تميؤ وتلف هذا الطوب أثناء التخزين . يتم منعه بالتغطية بطبقة من الشمع أو القار بما يمكن من عدم الالتصاق المباشر مع الهواء الجوي .

طوب الدولوميت الحراري بالربط المعدني يتفوق على ذلك بالربط بالقار بسبب ارتفاع درجة حرارة الحرق .

الخواص:

حراريات الدولوميت أكثر قسوة وأقل مقاومة حرارية مقارنة بحراريات المجنيزيا. الأفران المستخدمة للطوب الغير مثبت (Unstabilized) لا يتم تبريدها أثناء الاستخدام لأن الجير المطفي سوف يثميأ وأن الطوب سوف ينفثت . طوب الدولوميت يمكن أن يتحمل أحمال حتي ٣,٥ كجم/سم² عند 1650 م³ . وهو ضعيف المقاومة للصدمات الحرارية .

اللون ، الوزن النوعي ، المسامية :

طبقاً لنسبة الحديد والملوثات الأخرى في طوب الدولوميت ، فإن لونه يتغير من الأبيض إلي لون الجلد (B u ff) - الوزن النوعي والمسامية الظاهرية لحراريات الدولوميت هي ٣,٢ ، ٢٣% علي التوالي .

إجهاد الكسر علي البارد :

إجهاد الكسر علي البارد لحراريات الدولوميت المحتوي علي التري كالكسيوم سيليكيت هو أكثر من ٤٠٠ كجم/سم² .

المقاومة الحرارية تحت التحميل :

طبقا للمكونات فإن المقاومة الحرارية للدولوميت تتراوح ما بين ١٥٤٠ م إلي ٢١٣٠ م. حراريات الدولوميت التي تحتوي علي (Mono- Calicum, Dicalcium And Tricalcium Silicates) ، في بنائها تنصهر عند ١٥٤٠ ، ٢١٣٠ ، ١٩٠٠ م علي التوالي . المقاومة الحرارية تحت التحميل لطوب الدولوميت (المحتوي علي Mgo وعلي التراي كالسيوم سيليكيت) تحت تحميل ٢ كجرام/سم² هي ١٦٥٠ م.

مقاومة التقشف الحراري:

طوب الدولوميت المحتوي علي التراي كالسيوم سيليكيت له مقاومة قليلة لمقاومة التقشف مقارنة بطوب الماغنيزيت . ولكن طوب الدوليت المحتوي علي الداى كالسيوم سيليكيت له مقاومة أفضل ضد التقشف ذلك لأن الداى كالسيوم سيليكيت له حساسية أقل للتغير في درجات الحرارة مقارنة بسيليكات المغنسيوم . بتغير الداى كالسيوم سيليكيت إلي الشكل جاما Y عند التبريد إلي أقل من ٦٧٥ م ويصاحب ذلك زيادة في الحجم بنسبة ١٠% وبذا ينتج عن ذلك فرقعات بسيطة وتفتت للمادة . يمكن تكون داى كالسيوم سيليكيت في الشكل جاما من طوب الدولوميت بإضافة Fe_2O_3 حتي ٤% والذي لا يقلل بدرجة كبيرة المقاومة الحرارية لطوب الدولوميت .

مقاومة عدوانية الخبث :

رغم المقاومة الجيدة للصلب المنصهر ، فإن طوب الدولوميت له مقاومة منخفضة لعدوانية أكسيد الحديد وأكسيد الكالسيوم (Lime). أكسيد الكالسيوم الموجود في طوب الدولوميت الغير مستقر نشيط جدا ، لذلك فإن استخدام الطوب الغير مثبت من الدولوميت أو طوب الدولوميت المحتوي علي أكسيد الكالسيوم الحر يجب تجنبه وإلا فإنه عند تبريد الفرن للإصلاح فإن أكسيد الكالسيوم الحر الموجود سوف يمتص الرطوبة (نظرا لأنه شره للمياه) بما ينتج عنه تفتت للبطانة من طوب الدولوميت . يتم التثبيت لطوب الدولوميت وذلك بالمعالجة الحرارية (التطبيع - Tempering) في

فرن التطبيع.

الإستخدامات :

طوب الدولوميت المثبت أصبح البديل لطوب الماغنيزيت لرخص تكلفته . تستخدم حراريات الدولوميت في الأفران القلوية .

بخلط السدك للأفران الكهربائية وأفران الجمرة المكشوفة القاعدية يتم تحضيرها تجلط الدولوميت المحروق مع القار . حراريات الدولوميت (ذات حجم ١ - ١٠ لفحات المنخل) تستخدم كمادة تهذيبية لإصلاح لهذه الأفران بعد سحب المعدن وكذلك بينما تكون ساخنة . الدولوميت المحروق جيدا (منفردا أو مخلوط مع حبيبات الكوك) يستخدم في قفل فتحة سحب المصهور لأفران الجمرة المكشوفة القاعدية .

مغارف إزالة الكبريت من المعدن الساخن (خارج الفرن اللاصق بإضافة الجير المطفي) يتم بتطيينها بطوب الدولوميت . نظرا لمقاومته الجيدة للصدمات الحرارية وكذلك لمقاومة عدوانية الخبث أفضل من وصلات الطفل الحراري ، فإن الوصلات الغير محروقة من الدولوميت المثبت تستخدم في عمل الأجزاء العلوية من قضبان السدادة وخاصة عندما يكون زمن المكوث طويل .

مواد مقاومة حرارية عالية أخرى

أعلا درجة إنصهار لأكسيد هو الثوريا (Thoria) حيث درجة حرارة انصهار 3070°C (الثوريا هي أكسيد الثوريوم) ولكن إستخدامه محدود جدا بسبب سعره المرتفع وكذلك لصعوبة تشكيله .

الأكاسيد المستخدمة كثيرا هي الماغنيزيت (MgO) 2800°C ، الزركونيا 2680°C ، البريليا (Beryllia) 2570°C والألومينا 2040°C . يتم الطحن الدقيق للأكسيد النقي مع الماء ومادة ربط عضوية مؤقتة مثل النشا ، الشمع ، الكحولات ذات درجة حرارة الغليان المرتفعة ... إلخ مع الحرق للشكل النهائي فإن الرابط المؤقت يتم إتلافه والجسيمات الصغيرة يتم تليدها مع بعض البعض . تحدث

تفاعلات سطحية صلبة وبالتدرج تنتج بللورات دقيقة التي تحتوي الشكل .

كل من هذه الأكاسيد له خاصية هامة . فمثلا الألومينا هي أكثرهم صلابة وهي مفيدة في حالة الرغبة في مقاومة البلي (Wear) البريليا له مقاومة عالية للصدمات الحرارية ولا يختزل بالكربون أو بأول أكسيد الكربون حتي ٢٠٠٠ م . رغم درجة حرارة الإنصهار العالية للماجنيزيت فإنه لا يمكن استخدامه عند درجة حرارة أعلا من ١٧٠٠ م في جو الإختزال و ٢٢٠٠ م في جو الأكسدة نظرا لأن الزركونيا تحدث له تغيرات للبلورية فإن مقاومته للصدمة الحرارية منخفضة عند درجة حرارة أعلا من ١٢٥٠ م . ولكن يمكن تثبيته بإضافة أكسيد الكالسيوم أو أكسيد المغنسيوم .

تستخدم الأكاسيد النقية في عمل ما يسمى بالحراريات الفائقة (Super Refractories) والتي هي مناسبة للإستخدام عند الإلتصاق مع المعدن المنصهر في جو مؤكسد ذلك بسبب ارتفاع درجة حرارة إنصهارها . لإنتاج هذه الحراريات الفائقة من الأكاسيد ، فإنه يتم تليد المادة الكيماوية النقية أو صهرها في أفران كهربية يلي ذلك الطحن إلي مسحوق دقيق . يتم إكساب اللدونة للمخلوط باستخدام بعض مواد التلدين (Plasticisers) . يتم التشكيل للمخلوط بالبنق المنزلق (Slip Casting Extrusion) ، الضغط علي الساخن أو بالضغط الهيدروليكي . عند حرق حراريات الأكسيد هذه (عند درجة حرارة عالية والتحكم في حالات الجو والحرارة) . فإن المادة العضوية الموجودة ستحترق وإعادة التبلر مع التسخين يكسب الطوب كثافة عالية .

الأكاسيد الحرارية هذه سواء كانت في أشكال أو في شكل الطوب تكون عالية الكثافة ، وذات مقاومة عالية لعدوانية الخبث الكيماوية ولها إجهاد كسر علي البارد مرتفع ، والثبات عند درجات الحرارة العالية وهي نسبيا خاملة بالنسبة للغازات الهيدروجين والنيتروجين والأومونيا والمجال الكربوني أو الكبريتي .

عند درجة الحرارة العالية ، فإن لها مقاومة كهربية عالية وكذلك مقاومة للبري والإحتكاك والتآكل . ولكن استخدامها محدود لأغراض خاصة بسبب عدم توافرها ، التكلفة العالية للإنتاج وطرق التصنيع الخاصة للتشكيل . من بين الأكاسيد الحرارية

الهامة أكاسيد الزركونيا ، الثوريا ، البريليا وأكاسيد المغنسيوم والألومنيوم ، السيريوم

حراريات الكريد : (Carbide Refractories)

عموما كريد السيليكون أو (Carborundum) يستخدم في صناعة حراريات

الكريد .

كريدات مختلف العناصر مثل كريد الزركونيوم ، كريد التيتانيوم التتالم ، كريد البورون ... إلخ هذه تستخدم كحراريات لأغراض خاصة . وهي عالية التكلفة

كريد السيليكون (Sic):

كريد السيليكون أو الكاربورندم هو من أهم الحرارية. وهو ينتج في الأفران الكهربية بتسخين الخليط الآتي عند درجة حرارة حتى ١٣٠٠ - ٢٢٠٠ م°

رمل (SiO_2) ٢٥ - ٥٤ %

كوك (C) ٣٥ %

نشارة خشب ٧ - ١١

ملح ٤ - ١٥ %

يحدث التفاعل الآتي:

مكونات الكاربورندم المنتج هي كالأتي :

سيليكون ٦٥ %

كربون ٣٠ %

ملوثات حوال ٥ %

خامات حراريات كريد السيليكون هي

١- الكاربورندم (sic) : يتم طحنة الي حجم الحبيبات بنسب مناسبة لمختلف

المطلوب حجم الحبيبات من رقم منحل ١٦ الي رقم منحل ١٠٠ ثم الخلط

معا طبقا لنوع الحرارية المطلوبه

٢- مادة الربط مثل الجير الحي ، أو الجبس ، كبريتات الالومنيوم ، الدولوميت ،

الكاولين أو الفلسيسار ، الغراء و الزيت المعدني ، الفار ، المولاس ، الراتنج أو الجلسرين .

التصنيع :

يتم خلط الكاربورندم المطحون و مادة الربط مع قليل من الماء في خلاط (Pan Mil) .
حتى تشكيل الخليط في شكل قوالب بالطريقة اليدوية أو بالضغط .
يتم حرق الطوب السذي يتم تشكيلة في فرن كهربائي حتي ١٤٠٠-٢٠٠٠ م طبقا
للخاصية المطلوبة .

حراريات كربيد السيليكون . معروف أنها من الحراريات ذات النوعية المتفوقة و
تحتوي علي SIC ما لا يقل عن ٨٥% حبيبات SIC لها طبقة سيليكات رقيقة علي
أسطحها. يتم توفير الربط المناسب بتفاعل مادة الربط و الطبقة السطحية حيث تتكون
طبقة تلامس سطحي ملتصق . طبقا لنوع مادة الربط في كاربيد السيليكون الحراري
فإنه ينقسم الي خمس مجموعات .

(Semi Silicon Carbide)

- الكربيد شبه السيليكون

(Oxide of clay Bonded)

- أكاسيد الربط بالطفلة

(Nitride Bonded)

- الربط بالنيتريد

(Oxy Nitride Bonded)

- الربط بالأوكسي نايتريد

(Recrystallised)

- إعادة التبلر

حراريات الكربيدشبه السيليكون هي أساسا حراريات الطفلة الحرارية المضاف إليها
كمية من حبيبات كربيد السيليكون (SIC). أكاسيد الربط بالطفلة هي أكثر حراريات
الكربيد المستخدمة حاليا حيث يكون فيها (SIC) بنسبة أكبر من ٨٥% (عدا في حالة
إضافة الألومنيا أو الزركونيا) . تتم عملية الرباط بسبب تكون السليكون و السليكات
بإضافة الطفلة و الأكاسيد (مثال تلك للكالسيوم ، الحديد ، الباريوم) . حراريات
كربيد السيليكون المرتبطة بواسطة نيتريد السيليكون (Si_3N_4) هي أكبر مقاومة
للأكسدة ولكنها أكثر تعرض للتلف أثناء الدورات الحرارية . حراريات الربط

بالأوكسي نايتريد (و التي لها رباط بالسيليكون أوكسي نايتريد) لها خواص أكثر تطوراً مقارنة بتلك ذات المكونات من رباط الأكسيد وهي كذلك عالية المقاومة لنمو الأكسدة . وهي قوية عالية المقاومة للأكسدة، ولها ثبات في كثير من المجالات الكيميائية وترتبط بقوة مع حبيبات (Sic) . وهي توفر درجة أعلا من الحماية لحبيبات (Sic) أكثر من تلك الناتجة عن أي رباط آخر .

الخواص :

الإستفادة من حراريات الكاربوندم تقع علي صلابتها (Hardness) ، إنخفاض معامل التمدد ، القوة العالية والمتانة . عموماً هذه تستخدم لعمل الصقار (Saggar) (الصقار هو غلاف صندوقي من صلصال الحراريات تتصد فيه الخزفيات للشيء)، ولأفران حيث لا تتعرض بتأثير عوامل الإختزال .

تستخدم كربيدات السيليكون لأفران صهر المعادن مثل فرن الدست (Cupola) ، أفران إعادة صهر الألومنيوم ، بتبطين فرن البوتقة ، بوتقات إعادة صهر المعادن الغير حديدية وأفران التنقية بما فيه إختزال الألومنيوم ، وصهر الزنك وكذلك للأفران اللافحة (Muffles) ، غرف الحرق ، ومسترجع غازات حرق الفرن للخزفيات (Ceramic Recupertors) . بسبب صلابته العالية فإن المزلاقات (المزلقان Skids) المستخدمة في أفران إعادة التسخين تصنع فيها . وهذه تستخدم كذلك في صناعة بربوز (Nozzles) المحركات الصاروخية ، القطع الأمامية للصواريخ ، قضبان الحظون المقاوم للكهرباء ، المستخدم في إنشاء الأفران ذات درجات الحرارة العالية ...إلخ ، الأفران الدوارة المنتجة لما هو واقع واره البحر (Ultramarine)تستخدم حراريات كربيد السيليكون . استخدام Sic في وجود الأكسجين أو أكسيد الحديد وخاصة عند درجات الحرارة العالية يجب تجنبه نظراً لأن تلك عدوانية بالنسبة له .

السيليمانيت والمواد المرتبطة به : (Sillimanite , Allied Materials)

الأي هي المواد الطبيعية التي تستخدم كحراريات :

سيليمانيت ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) Sillimanite

موليت ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) Mullite

كيانيت ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) Kyanite

السيليمانيت :

يوجد السيليمانيت كإبر طويلة بللورية . البلورات هي بنظام المعين المستقيم (Orthorhondic)

صناعة المواد الحرارية من السيليمانيت الموجود في الطبيعة :

يوجد السيليمانيت في شكل كتل وكمرات . وهذه يتم تقطيعها إلى كتل صغيرة ، ثم يتم الطحن والخلط مع الطفل الحراري ثم التشكيل في الشكل الحراري .

الخواص :

- له درجة ليونة عالية أعلا من 1800°م وهو ثابت جدا حتي درجة حرارة الليونة .
- ثابت في المجال المؤكسد والمختزل .
- معامل التمدد منخفض حتي ٤٥ ، ١٠ × ١٠^{-٦} وهذا يمكنه من تحمل التغيرات المفاجئة في درجة الحرارة .
- لا يحدث له أي تغير حجمي مع التسخين .
- له تفاعل متعادل جيد .
- مقاوم جيدا لعدوانية التآكل لأي خبث ومقاوم للإحتكاك .
- له قوة عالية حتي درجة حرارة الليونة .
- له قدرة توصيل حراري عالية وهي (10 Btu/ hr/ sqft/of/inch)
- وزنه النوعي ٣،٢٣ .
- السيليمانيت النقي لا لون له ولكن عموما يكون لونه بني بسبب وجود الحديد .

الإستخدامات :

يستخدم في عمل الطوب ، الكتل ، البوتقات ، المزلجات ، ووصلات الحراريات للسلع الكهربائية وأنابيب أفران الحريق .

الكينائيت : Kyanite

الكينائيت له كل صفات ومميزات السيليمانيت ولكنه أقل ليونه من السيليمانيت وصلابته في ٥ إلى ٧ بينما السيليمانيت له صلابه من ٦ إلى ٧ موهز (Mohs)

درجة حرارة التحلل للكينائيت هي ١٣٥٠ - ١٣٨٠ م°

العيب الآخر في الكينائيت هو أن له نسبة تمدد حجمي أكبر من السيليمانيت . التغير في الحجم للكينائيت هو ١٦% و للسيليمانيت هو ٦% .

الموليت : (Mullite)

الموليت نادر الوجود في الطبيعة ($3Al_2O_3.2SiO_2$) وهو يتكون عند تسخين الكينائيت أو السيليمانيت . وهو يتكون كذلك في الطفل المحروق .

الموليت شديد الصلابه ، وزنه النوعي ٣،١٦ . درجة حرارة تحلله هي ١٨١٠ م° وهو شديد المقاومة للقلويات ولكن الزجاج المنصهر يحدث به تآكل وتلف .

لذلك فإن كل هذه الصفات تجعله من الحراريات الجيدة جدا . عند الرغبة في عمل حراريات جيدة من الطفل الحراري ، فإن مكوناته يجب أن يتم إتزانها بإضافة قليل من البوكسميت (Al_2O_3) . وبعض المعجلات (Accelerators) مثل القلوي ، السيليكات ، المجنيزيا .. إلخ ، ذلك لتأكيد التركيب الكيماوي للموليت . ثم الحرق عند ١٣٥٠ - ١٣٨٠ م° وذلك لتكوين الموليت ($3Al_2O_3.2SiO_2$) .

تلف الحراريات : (Failure Of Refractories)

أكبر اسباب تلف الحراريات هو التفاعل الكيماوي في المجال الذي تعمل فيه.

حيث يكون بالتأكيد مجال غير مماثل فمثلا ، الحرارية الحامضة لا يتم استخدامها في أفران مستخدمة لمواد خفض الصهر (Fluxes) القلوية أو الخبث والعكس صحيح . رغم استخدام مواد خفض درجة حرارة الصهر المناسبة فإنه قد توجد ملوثات التي تتفاعل مع طبقة البطانة . في التفاعل الكيماوي تلعب مسامية المادة الحرارية دور هام . كلما زادت المسامية كلما زاد العمق الذي يتسرب اليه الخبث ويتلف الحرارية . المسامية تؤثر كذلك علي التفاعلات مع الغازات . ترسيب الكربون من أول أكسيد الكربون في حراريات الطفلة الحرارية في الفرن اللافح هو من الأسباب الهامة في تلف الحرارية. ترسيب الكربون يسبب حدوث إجهادات داخلية عالية بما ينتج عنه تفتت للطوب . كلما زادت درجة الحرارة حيث زاد حدوث التفاعل الكيماوي . أحيانا إرتفاع درجة الحرارة بعد الحد الأمن يحدث تلف سريع في الحرارية . أخيرا فإن تقلب أو حركة المادة يعتبر هام جدا .إذا كان هناك تقلب علي السطح فإن السطح الجديد يتعرض بسرعة للتفاعل الكيماوي ويحدث به التلف .

عدوانية الخبث أو المعدن علي الحرارية لا يمكن تجنبه . يمكن خفضه بإزالة الأكسدة (De.Oxidation) بمعدن الألومنيوم . كمية وأساسا سيولة الخبث هي العوامل ذات التأثير علي التفاعل مع الحرارية . نواتج التفاعل هي كالسيوم - ألومنيو - سيليكات ذو درجة الإنصهار المنخفضة وكذلك الفيريت (Ferrites)

الموليت (Mullite) النقي له مقاومة مرتفعة بالنسبة للخبث . المنجنيز في الصلب المرن هو أكثر المكونات نشاط في المعدن . فهو يختزل SiO_2 في الحرارية SiO_2 في بناء الموليت أو في شكل كريستوباليت (Cristobalite) أقل نشاطا عن وجوده في شكل آخر . بينما السيليكون في الصلب يعيق العدوانية علي الحرارية ، فإنه نفسه يمكن أن يدخل السيليكا الزجاجية في مسبوكات الصلب وذلك في حالة وجوده بكمية كبيرة . لذلك فإن نسبية Mn / Si في الصلب هامة جدا وذلك بالنسبة لتآكل الحرارية . تأكل الحرارية حيث تنتج حبيبات من الحرارية غير مرغوب فيه أكثر من التآكل بالتفاعل المنتج

لمواد زجاجية تتغلغل في الصلب . الصلب ذو الكربون المنخفض ينتج جسيمات حرارية متغلغلة ، وبذا يعمل علي خفض عمر الخدمة لبطانة المغرفة الحاملة للمصهور ، بينما يكون العمر مرتفع نسبيا مع الصلب حيث الكربون متوسط .

الصلب يحتوي ١% كربون ، ٣.٤% منجنيز ، ٣.٤% سيليكون ١% كروم لايحدث نحت (Erode) لبطانة الحرارية ولكن يعطي سطح زجاجي ناعم . عمر الخدمة للحراريات يتوقف كذلك علي فترات التوقف (Dwelling) ودرجة حرارة التشغيل . تفاعلات إضافية للحراريات من الناحية العملية كالآتي:

• العفارة (Dusting) يسبب تحول C_2S يمكن منعها بإضافة B_2O_3, P_2O_5 أو Cr_2O_3

• أكسيد الحديد يجب أن يكون منخفض .
• تأكل الحرارية بالزجاج يرجع إلي تسرب أيونات الكلوي إلي المجال الصلب
• ارتفاع ٥٠ م في درجة حرارة التشغيل لصهر الزجاج ، سوف تقلل من عمر الحرارية بنسبة ٥٠ % . درجة الحرارة الأعلا أساسية لسرعة العمل وتحسين نوعية الزجاج .

• يلزم تجنب السيليكا الدقيقة والحديد الحر في الجو المختزل .
• وجود V_2O_5 في وجود ٢% Na_2O يقلل من القدرة الحرارية لكل من طوب السيليكا والطوب الحراري بمقدار ٢٠ م ولكن في وجود ٥% من Na_2O بحوالي ٨٥ م ، ٤٠ م لكل من طوب السيليكا والطوب الحراري علي التوالي .

• ٤-٥% من Fe_2O_3 تقلل من قدرة المقاومة الحرارية لطوب السيليكا بحوالي ٣٠ م ولكن لا تؤثر علي الطوب الحراري ، ولكن Cao له تأثير خطير علي الطوب الحراري .

السبب الآخر الهام هو التشطي أو التقشف (Spalling) ، وسببه قد يكون حراري أو ميكانيكي أو خاص ببناء الحرارية نفسها ومكوناتها . التشطي أو التقشف الحراري

قد يكون بعدم تساوي التمدد أو الإنكماش عند الأجزاء المختلفة بسبب التغير السريع في درجة الحرارة . التشظي الميكانيكي يكون غالبا بسبب الإهمال في تحميل الفرن أو بسبب إزالة المواد منه والذي بسبب إتلاف للحراريات . يحدث التلف بسبب التغير في مكونات الحراري الناتج عن التفاعلات مع الخبث .. إلخ ، وتكون النتيجة هو تغير معامل تمدده . لذلك فإن أجزاء مختلفة تتمدد وتتكمش بدرجات مختلفة. التشظي للحراريات يمكن خفضه بالتصميم الجيد ، وبناء وتشغيل الفرن بطريقة جيدة .

يمكن إضافة الإحتكاك والبري (Alabrasion) كسبب آخر هو يعني الإحتكاك المسبب لإزالة المادة . في الفرن ، توجد حركة للمواد وعادة تنزلق علي طول الحراري مواد صلبة وقوية . توجد مواد منصهرة من الخبث والمعادن المنذفة . الغازات الحاملة للأتربة عادة تتحرك بسرعات عالية . كل هذا الإحتكاك للحراريات يسبب إتلافه .

إختيار الحراريات

إختيار الحراري المناسب يتوقف علي عوامل كثيرة التي يمكن تصنيفها طبقا للمجموعات التالية :

- عوامل متعلقة بالمواد الحرارية : حيث يلزم دراسة الحراريات المتاحة .
- عوامل متعلقة بتصميم الفرن : وهو ما نوع الحراري الذي يلزم استخدامه في فرن معين . يتوقف إختيار الحراري علي نوع الفرن ، ظروف التسخين (مثال فرن الكوك يظل باستمرار عند درجة حرارة عالية لسنوات ولكن المعرفة يوميا يحدث لها تبريد) ، التحميل ، درجة العزل ، التجاوز لمعامل التمدد في الفرن ، إذا ما كانت هناك أجزاء متحركة من عدمه (كما هو الحال في الفرن الدوار والفرن النفقي) إلخ.
- عوامل متعلقة بالتشغيل: العامل الهام هنا هو الطبيعة الكيماوية للمواد (مثل الخامات ، مواد خفض درجة حرارة الإنصهار ، الوقود ... إلخ) الملتنقة

بالحراريات ، درجة الحرارة في الأجزاء المختلفة من الفرن ، التغيرات في درجة الحرارة ، سيولة العادن المنصهرة ، الخبث ، سرعة الغازات الملتصقة بطبقة البطانة للفرن والبري الناتج عن حركة الشحنة ، الغازات ، المعدن المنصهر .

- عوامل إقتصادية : مع تقدير التكاليف الأولية لمختلف الحراريات إلا أن عمر الخدمة أثناء الإستخدام يجب أن يؤخذ في الإعتبار تكاليف تداول الحراريات ، النقل ، وتكاليف وضع الطوب ، هي نفسها سواء تم استخدام أنواع جيدة أو متدنية من الطوب الحراري . وفي حالة استخدام أنواع متدنية وعمر خدمته قصير ، فإنه يلزم استبداله عادة . وهذا سوف يترتب عليه تكاليف تداول إضافية ، بالإضافة إلى الفقد في الإنتاج الناتج عن التوقف . لذلك فإن التكلفة الحقيقية للحراريات يجب إعتبارها علي أساس تأثيره علي التكاليف الكلية للإنتاج .

موجز الصفات وخواص الطوب الحراري

نوع الطوب	الخواص
عالي الألومينا High - Alumina	مقاومة حرارية عالية ، والتي تزداد مع زيادة المحتوى من الألومينا . قوة ميكانيكية عالية عند درجات الحرارة العالية . مقاومة مابين الممتازة والمعتدلة للتشظي . مقاومة أعلا (عن طوب الطفل الحراري) للتآكل بمعظم الخبث القلوي ومواد خفض درجة حرارة الإنصهار القلوي .
الطفل الحراري Fire - Clay	تختلف الخواص الطبيعية والكيمائية للطفل الحراري كثيرا ، لذلك فإن طوب الطفل الحراري ذو الخواص المختلفة كثيرا يكون متاحا . لهذا السبب كان استخدامه

نوع الطوب	الخواص
	<p>مناسب في ظروف تشغيل مختلفة كثيرا . معظم طوب الطفل الحراري له مقاومة جيدة نسبيا بالنسبة للنشطي وكذلك قيمة جيدة للعزل الحراري . وله مقاومة مقبولة للخبث الحامضي ومواد خفض درجة حرارة الإنصهار ، ولكن المقاومة لهذه المواد القلوية (الخبث ومواد خفض الحرارة) تكون منخفضة .</p>
السيليكا Silica	<p>قوة مقاومة حرارية عالية، ومقاومة للبري . قوة ميكانيكية عالية عند درجات الحرارة المرتفعة . التوصيل الحراري عند درجات الحرارة العالية هو حوالي ٢٥% أعلا من ذلك لطوب الطفل الحراري . مقاومة عالية ضد تآكل الخبث الحامضي . مقاومة مقبولة لعدوانية أكسيد الكالسيوم (Lime)، أكسيد المغنسيوم وأكسيد الحديد . الخبث القلوي شديد العدوانية علي السيليكا وكذلك الفلورين شديد العدوانية. غير معرض للنشطي الحراري عند درجة حرارة أعلا من 650°م ، مقاومة ضعيفة للنشطي عند درجات الحرارة المنخفضة .</p>
الماجnezيت Magnesite	<p>له قوة مقاومة حرارية عالية وقدرة توصيل حراري عالي ، مقاومة عالية ضد التآكل بالخبث القلوي ، ضعف المقاومة للخبث المحتوي علي نسبة عالية من السيليكا. الطوب بالرباط الكيماوي أو بالغلاف المعدني له مقاومة جيدة ضد النشطي .</p>

نوع الطوب	الخواص
الكروم Chrome	مقاومة عالية للتآكل بفعل الخبث القلوي ومقاومة مقبولة للخبث الحامضي ومواد خفض درجة حرارة الإنصهار (Fluxes). عموما الخبث القاعدي لا يلتصق بطوب الكروم . في ظروف معينة غير عادية يمتص أكسيد الحديد ويسبب انفجار خطير . التوصيل الحراري منخفض مقارنة بذلك الطوب الماغنيزيت ولكنه أعلا من ذلك الطوب الطفل الحراري .
الماغنيزيت كروم Magnesite- Chrome	قوة ميكانيكية وثبات للحجم عند درجات الحرارة العالية . مقاومة ممتازة ضد التشطي . مقاومة عالية ضد التآكل بفعل الخبث القلوي .
الكروم الماغنيزيت Chrome – Magnesite	قوة ميكانيكية عالية وثبات للحجم عند درجات الحرارة العالية . مقاومة مابين الممتازة والجيدة للتشطي . مقاومة عالية للتآكل بفعل الخبث القلوي.
Forsterite $2MgO.SiO_2$	مقاومة حرارية عالية . قوة ممتازة عند درجات الحرارة العالية . مقاومة التآكل للمواد القلوية . مقاومة لمعظم الخبث القلوي . الخبث الحامضي عدواني ويسبب التآكل .

عموما الحرايات القلوية أقل مقاومة للصدمة الحرارية مقارنة بحرايات الألومينا العالية . ولكن مقاومة التشطي لبعض الطوب القلوي ذات المكونات الخاصة تساوي ذلكلطوب الطفل الحراري ذو الإستخدام الخاص (Superduty Fireclay Bricks).

الطوب القلوي من أي نوع يمكن تغليفه بمعدن . هذا النوع من الطوب له مقاومة جيدة ضد التشطي – معظم الطوب بالغلاف المعدني هو من نوع المكونات من الماغنيزيت – كروم .

الفصل الثاني

2

اختبارات الحرارية

Testing of Refractories

الاختبار الصحيح للمواد الحرارية يمكن عمله على أساس المعلومات الكاملة عن ظروف الخدمة وخواص الحرارية. يتم تقييم الحرارية وذلك بالاختبارات العملية. الخواص الآتية للحراريات تجرى لتقييم مناسبتها:

- نقطة الانصهار والتي تسمى كذلك نقطة اللبونة.
 - المقاومة الحرارية تحت التحميل.
 - النفاذية.
 - الكثافة الكلية.
 - النفاذية.
 - إجهاد الكسر على البارد.
 - معامل التلف (modulus of rupture)
 - مقامل التقشر (spalling resistance)
 - التوصيل الحراري والمقاومة/ التوصيل الكهربائي.
 - مقاومة الاحتكاك، الخبث والأبخرة/ الغازات.
- سيتم وصف طرق الاختيار للخواص السابقة في الآتي:

١- المقاومة الحرارية أو نقطة الانصهار:

المواد النقية تنصهر بدقة عند درجة حرارة محددة. معظم المواد الحرارية تتكون من حبيبات ذات درجة حرارة إذابة مرتفعة ملتصقة مع بعضها. عند درجة الحرارة العالية، ينصهر الزجاج ومع ارتفاع درجة الحرارة، فإن الخبث الناتج يزداد كمياً بالإذابة الجزئية للحبيبات الحرارية. درجة الحرارة التي يحدث عندها هذا العمل تسبب فشل هرم الاختبار (قمع الاختبار) في حمل وزنه والذي يسمى نقطة الانصهار الحراري. الجدول (الآتي) يوضح نقطة الانصهار لبعض المركبات النقية المستخدمة في الحرايات.

جدول يبين نقطة الانصهار للمركبات النقية:

نقطة الانصهار °م	الرمز	المركب النقي
٢٠٥٠	Al_2O_3	الألومينا
٢٥٧٠	CaO	الجير الحي (lime)
٢١٨٠	$FeO \cdot Cr_2O_3$	الكروميت
٢٢٧٥	Cr_2O_3	أكسيد الكروم
٢٨٠٠	MgO	المجنزيا
١٧١٥	SiO_2	السيليكا
١٨٥٠	TiO_2	تيتانيا
١٨١٠	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	المولايت mullite
١٨١٦	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	سيليمانيت Sillimanite
٢١٣٠	$MgO \cdot Al_2O_3$	Spinel
صلب عند ٢٢٤٠	SiC	كاربوندم Carborundum
٢٦٧٧	ZrO_2	زركونيا Sirconia

نقطة الانصهار °م	الرمز	المركب النقي
٢٥٣٠	BeO	بيريليا berylia
صلب عند ٣٠٠٠	ThO ₂	ثوريا
صلب عند ٣٦٠٠	C	الكربون

قمع المكافئ الحراري (Pyrometric Cone Equivalent)

درجة الحرارة التي عندها يفقد المقاوم الحراري شكله تحت وزنه يعرف بنقطة ليونته، والذي يعين بواسطة قمع المكافئ الحراري (PCE). الحراريات، بسبب تعقيداتها الكيميائية، فإنها تنصهر على التوالي خلال مجال من درجة الحرارة. القمع القياسي المكافئ الذي ينصهر إلى نفس الدرجة لقمع الاختبار يسمى قمع المكافئ الحراري (PCE). قمع المكافئ الحراري يبين فقط درجة حرارة الليونة ولكن في حالة الحراريات في الخدمة فإنها تكون معرضة للأحمال والتي تعمل على تغيير الشكل الحراري عند درجة حرارة أقل عن تلك المبينة بواسطة قمع المكافئ الحراري. مع التغير في الظروف البيئية مثل حالة الاختزال، فإن قيمة قمع المكافئ الحراري تتغير كثيرا.

عند بعض من درجة الحرارة ما بين تلك التي يبدأ عندها تكون السائل وتلك التي تكون عندها كل الطوبية في حالة سائله، يكون جزء السائل يصبح في حالة حيث تكون الطوبية غير قادرة على تحمل وزنها ويتغير شكلها ببطء. فإذا كانت عينة الاختبار في شكل هرم، ارتفاع ١,٥ بوصة على قاعدة مثلثة حيث كل جانب ٢/١ بوصة (طرف واحد من الهرم يكون عموديا على القاعدة)، مع تسخين العينة هذه بمعدل ٥٠ °م كل خمسة دقائق، فإن درجة الحرارة التي عندها إنحلت العينة بحيث تصبح القمة في مستوى القاعدة حيث تسمى درجة الحرارة هذه بدرجة المقاومة الحرارية (refractoriness). درجة الحرارة التي يحدث عندها هذا تزداد مع زيادة المحتوى من الألومينا.

السيليمانيت أو الطوب عالي الألومينا المحتوي على أكثر من ٧٢% Al_2O_3 لا يكون سائل عند ١٥٤٥ °م (مع التجاوز عن وجود مواد خفض درجة حرارة الانصهار fluxes) حتى الوصول إلى درجة حرارة ١٨١٠ °م. عند درجة الحرارة هذه فإن أي مولات موجودة فإنه يتحلل إلى سائل و كورندم (corundum هو أكسيد الألومنيوم الطبيعي). المقاومة الحرارية العالية لطوب السيليمانيت يمكن توضيحه بذلك. معظم الحرارية الأخرى لها نقطة انصهار (قيمة المقاومة الحرارية) أعلى من تلك التي عندها تعمل الأفران العادية.

الأقماع القياسية تسمى أقماع سيجر (Segar cones) وأقماع (Orto cones) وهي ترقم طبقاً لمقاومتها الحرارية/ أو نقطة انصهارها.

متوسط درجة المقاومة الحرارية لبعض أنواع الطوب موضح في الجدول (٤)

الجدول لبيان متوسط قيم المقاومة الحرارية:

الطوب	رقم قمع سيجر	درجة المقاومة الحرارية °م
السيليكا silica	٣٢ - ٣٤	١٧١٠ - ١٧٥٠ °م
السيليكسي siliceous	٢٨ - ٣١	١٦٣٠ - ١٦٩٠ °م
الطوب الحراري (٢٣ - ٣٠ % Al_2O_3)	٢٧ - ٣٠	١٦١٠ - ١٦٧٠ °م
طوب حراري (٣٠ - ٣٥ % Al_2O_3)	٢٨ - ٣١	١٦٣٠ - ١٦٩٠ °م
طوب حراري (٣٥ - ٤٠ % Al_2O_3)	٢٩ - ٣٣	١٦٥٠ - ١٧٣٠ °م
طوب حراري الومنيومي	٣٢ - ٣٥	١٧١٠ - ١٧٧٠ °م
سيليمانيت Sillimanite	٣٥	١٧٧٠ °م
ماجنيزيت magensite	٣٨	١٨٥٠ °م
بوسكايت bauxite	٣٨	١٨٥٠ °م
كروم	٣٨	١٨٥٠ °م
كربيد السيليكون X	٣٨	١٨٥٠ °م

3

الطوب	رقم قمع سيجر	درجة المقاومة الحرارية م°
كربون*	٣٨	١٨٥٠ م°
Zirconia	٣٨	١٨٥٠ م°

× مصمم للتحلل عند درجة حرارة منخفضة.

* يتحلل عدا في حالة المجال شديد الاختزال.

أرقام الأقماع الهرمية القياسية ودرجة حرارة انصهارها موضح في الجدول الآتي:

جدول المكافئ القياسي للقمع الحراري:

قيمة قمع أورتون م° (مواصفات إنجليزية)	قيمة قمع سيجر م° (مواصفات ألمانية)
١٢	١٣٣٧
١٣	١٣٤٩
١٤	١٣٩٨
١٥	١٤٣٠
١٦	١٤٩١
١٧	١٥١٢
١٨	١٥٢٢
١٩	١٥٤١
٢٠	١٥٦٤
٢٣	١٦٠٥
٢٦	١٦٢١
٢٧	١٦٤٠
٢٨	١٦٤٦
٢٩	١٦٥٩
٣٠	١٦٦٥
٣١	١٦٨٣

قيمة قمع أورتون °م (مواصفات إنجليزية)	قسمة قمع سيجر °م (مواصفات ألمانية)	
١٦٩٩	—	٣١,٥
١٧١٧	١٧١٠	٣٢
١٧٢٤	—	٣٢,٥
١٧٤٣	١٧٣٠	٣٣
١٧٦٣	١٧٥٥	٣٤
١٧٨٥	١٧٨٠	٣٥
١٨٠٤	١٨٠٥	٣٦
١٨٢٠	١٨٣٠	٣٧
١٨٥٠	١٨٥٥	٣٨
١٨٨٠	١٨٧٥	٣٩
١٩٢٠	١٩٠٠	٤٠
١٩٦٠	١٩٤٠	٤١
٢٠٠٠	١٩٨٠	٤٢

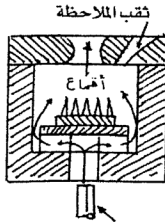
معدة اختبار القمع الهرمي لتعيين المقاومة الحرارية/ نقطة الليونة سيتم توضيحها في الآتي:

اختبار مكافئ القمع الحراري (Pyrometric Cone Equivalent)

الغرض من هذا الاختبار هو لتعيين نقط الليونة للمادة الحرارية بمقارنة أقماع الاختبار المعدة من المادة الحرارية تحت الاختبار بالأقماع القياسية التي يتم تسخينها في فرن مناسب. الأقماع المجففة تستخدم لدراسة مقارنة لمادة غير معلومة مع السلوك المعلوم للأقماع المستخدمة ولكن بهذه الطريقة فإننا نحصل على نتائج في مجال درجة حرارة $\pm 10^\circ \text{C}$.

الفرن الذي يتوفر فيه جو متعادل أو مؤكسد باستمرار يفضل لهذا الاختبار. يتم طحن المادة الحرارية بعد أخذ العينة المناسبة وتقسيم إلى أربع لتمر خلال المنخل رقم (IS No

20) لتجنب الخفض الكبير في القطر. كمية معينة من المادة المحدد حجمها يتم أخذها وبمساعدة مع كمية من المادة الرابطة (مثل الغراء أو الدكسترين) وإضافة الماء يتم إعداد مكافئ القمع الحراري. العينة التي تم إعدادها تكون بمقياس ٨ ملليمتر على أجناب القاعدة وارتفاع ٢٥ ملليمتر. عند الجفاف لأقماع الاختبار والأقماع القياسية الحرارية يتم وضعهم على لوحة من مادة حرارية ذات التكوين الذي لا يؤثر على انصهار الأقماع. أقماع الاختبار التي تم إعدادها يتم وضعها في الفرن وتسخين الفرن كهربيا. يتم تجنب حالات الاختزال في الفرن أثناء التسخين وكذلك يجب تجنب توجيه اللهب مباشرة نحو الأقماع أو اللوح الحامل لها. يتم اختبار الفرن على مراحل بالنسبة لتجانس توزيع الحرارة. ليونة القمع ستظهر بانحناء القمة نحو طرف سطح اللوح. يتم تسجيل نقطة الليونة بالنسبة للقمع القياسي الحراري والذي يقابل في نفس الوقت لليونة مع قمع الاختبار. فرن نقطة الانصهار (بالوقود الغازي) موضح في الشكل (٣/٩).



شكل (٩) فرن نقطة الأنصهار يعمل
بحرق الغاز

المقاومة الحرارية تحت الأحمال:

هذا الاختبار يعين درجة حرارة الليونة للحرايات تحت الأحمال المبين إما بالإنسلاخ والهبوط إلى أسفل أو الكسر لعينة الاختبار. يتكون فرن الاختبار (بالتسخين الكهربائي) من أنبوبة تسخين بقطر داخلي ١٠٠ - ١٢٠ ملليمتر وطول حوالي ٥٠٠

مليمتر وسماك الجدار ١٥ - ٢٠ مليمتر. تستخدم مواسير التسخين من الكورندم أو الماغنيزيت...الخ. منطقة أقصى تجانس في درجة الحرارة يكون أدنى طول لها هو ١٢٠ مليمتر.

تنظيم استخدام التحميل يكون بحيث استخدام حمل ٢ كجرام/ سم^٢ بوضع عمود على عينة الاختبار. يتم الإعداد لتسجيل التغيرات في ارتفاع عينة الاختبار وكذلك لامتصاصها بما لا يقل عن ٢٠ مليمتر. عينة الاختبار من الطوب الجاري اختبارها تكون في شكل اسطوانة بقطر ٥٠ مليمتر وارتفاع ٥٠ مليمتر مأخوذة بعد عمل ثقب في الجزء المركزي من الطوبة. يستخدم العمل بواسطة قضبان من الكربون أو من الموالات. أعمدة الكربون ذات قطر من ٥٥ - ٦٠ مليمتر يتم فرضها بين عينتين اختبار. ترفع درجة الحرارة بمعدل حوالي ١٥ °م في الدقيقة حتى ١٠٠٠ °م وأعلى من ١٠٠٠ °م بمعدل ثابت ٨ °م في الدقيقة. درجة الحرارة في اللوح الأفقي قد تتغير كثيراً، أقصى اختلاف المسموح به في المنطقة الساخنة هو ٢٠ - ٣٠ °م. يتم توقيع التغير في الطول مقابل الوقت في إحداثيات مستطيلة. مع ارتفاع درجة الحرارة بمعدل ثابت تقريباً وتوقيع التغير في الارتفاع بالنسبة للوقت، هذا المخطط يوفر منحنى تغير الشكل طبعاً للتغير في درجة الحرارة (temperature deformation curve). يتم قياس درجة الحرارة بواسطة الحراري البصري (optical pyrometer) يرى ويضبط فوق قاع الأنبوب الحراري المقفلة عند القاع ومعلقة في الفرن عند بداية الاختبار عند المنتصف تقريباً لعينة الاختبار. عندئذ يلزم توفير جهاز حساس لقياس التغير في الشكل كل دقيقة. تعطى النتائج الآتية بالإضافة إلى المنحنيات التي تم توقيعها. درجة الحرارة (Ta) التي تبين النقطة التي عندها يهبط المنحنى ٣ مليمتر أسفل أعلى نقطة (Te) هي درجة الحرارة التي عندها نقص ارتفاع العينة بعدد ٢٠ مليمتر من ارتفاعها الأصلي. نتيجة الكسر (قبل الألوان) وعند عدم حدوث الليونة الحقيقية، استبدل درجة الحرارة. (Tb) تشير إلى نقطة الانكسار لدرجة الحرارة (Te). تكون درجة الحرارة الصحيحة لأقرب ١٠ °م.

المقاومة الحرارية للمنتج تكون أقل في الأهمية عن المقاومة تحت التحميل. في جميع إنشآت الأفران، تكون إنشآت الطوب معرضة للإجهاد. هذا ناتج عن أثقال أحمال الطوب الفوقية، بفعل القوة الدافعة للقوس، أو نتيجة الضغط الناتج عن فاصل التمدد الغير مناسب. هذا الضغط يمكن أن يسبب تغير في شكل الطوبة عند درجة حرارة أقل كثيرا عن نقطة انصهارها. هذا للتأثير واضح خاصة في الطوب الحراري. تحت الأحمال ٢ كجرام/سم^٢ (القياس المستخدم لهبوط هذا النوع من الطوب) يحدث هبوط حوالي ٥% عند درجة حرارة ٢٠٠°م أقل من نقطة الانصهار.

من الناحية العملية، يكون وجه واحد من الطوب عند أعلى درجة حرارة، بحيث أنه أحيانا يمكن للجزء البارد من الطوب أن يتحمل الحمل عندما تكون درجة حرارة وجه التشغيل أو الطوبة من المتوقع أن تنهار. الصفة المميزة للحراري تشمل المعرفة عن نظام حجم وطبيعة المسامية بالنسبة للمادة الصلبة، وحجم وتقوُّب الكسر، ووجود أو عدم وجود عيوب في الصناعة. الصفة تتوقف على خواص المادة الحرارية، مقاومة التفكك والاحتكاك والخبث والتوصيل الحراري. بالنسبة للمنتجات الحرارية يكون التحكم في الخواص طبقا لحجم الطفلة، طبيعة التدرج للكسر (grog)، درجة حرارة الحرق واستمرارها.

نعومة الحبيبات تساعد على التزجيج (vitrification). الطوب بالشكل الرقيق يتوقع أن يلين تحت حمل عند درجة حرارة أقل قليلا عن المنتج الخشب بنفس المكونات. بعض قيم المقاومة الحرارية تحت الأحمال لبعض أنواع الطوب موضحة في الجدول الآتي:

جدول لمتوسط قيم المقاومة الحرارية تحت الأحمال:

المقاومة الحرارية تحت الأحمال ٢ كجرام/سم ^٢ = ٢٨ رطل/البوصة المربعة		الطوب الحراري
رقم قمع سيجر	درجة الحرارة °م	
٣٢ - ٢٩	١٧١٠ - ١٦٥٠	السيليكا
٢٧ - ١٨	١٦١٠ - ١٥٠٠	السيليكي siliceous
١٦ - ١٣	١٤٦٠ - ١٣٨٠	الطوب الحراري (٢٥ - ٣٠ % Al_2O_3)
٢٦ - ١٩	١٥٢٠ - ١٤٦٠	الطوب الحراري (٣٥ - ٣٨ % Al_2O_3)
٢٩ - ٢٦	١٦٥٠ - ١٥٨٠	الطوب الحراري عالية الألومينا (٣٨ - ٤٥ % Al_2O_3)
٢٩ <	١٦٥٠ <	سيليمانيت sillimanite
٢٨ - ١٨	١٦٣٠ - ١٥٠٠	الماجنييت الماغنيزيت
١٦ - ١٢	١٤٦٠ - ١٣٥٠	الكروم
٣٢ - ١٨	١٧١٠ - ١٥٠٠	Chrome magnesite
٣٤ <	١٧٥٠ <	Silicon carbide
٣٤ <	١٧٥٠ <	الكربون
٢٠ - ١٨	١٥٣٠ - ١٥٠٠	الزركونيا

التغير الخطي الثابت عند إعادة التسخين

Permanent Linear Change (PLC) on Reheating

ثبات الحجم، الستمدد والانكماش عند درجات الحرارة المرتفعة: انكماش أو تمدد الحرارية يمكن أن يحدث أثناء الخدمة، مثل هذه التغيرات المستديمة في الأبعاد يمكن أن تكون بسبب الآتي:

- التغيرات في الأشكال التآصلية (موجود بشكلين مختلفين أو أكثر allotropic forms) والذي يسبب تغير في الجانبيه النوعية.

- التفاعل الكيماوي المنتج لمادة جديدة ذات جاذبية نوعية مختلفة.
- تكوين المجال السائل.
- تفاعلات التخميص (sintering).

يمكن أحيانا أن يحدث بسبب مادة خفض درجة الحرارة الانصهار (fluxing) مع الخليث أو الأتربة أو بفعل القلويات أو حراريات الطوب الحراري، لتكوين سيليكات الألومينا القلوية، مسببا التمدد والتمزق. هذا مثال الذي يلاحظ في الأفران العالية. بينما يكون المفضل هو تأثر كل هذه التغيرات أثناء التصنيع، إلا أن ذلك مستحيل لأسباب اقتصادية. التغير الخطي الثابت عند إعادة التسخين والتبريد للطوب يبين الثبات الحجمي للمنتج وكذلك الطريقة المناسبة لمعايير العمل أثناء التصنيع. هذا واضح خاصة عند قياس درجة التغير التي تتم في صناعة طوب السيليكا.

التمدد الحراري العكسي:

أي مادة عند تسخينها فإنها تتمدد وتتقلص بالبرودة. التمدد الحراري العكسي هو انعكاس على انتقالات المجال التي تحدث أثناء التسخين والتبريد. يتم مراعاة التغير الخطي الثابت والتمدد العكسي الحراري في تصميم البطانة الحراية بالنسبة لوصلات التمدد.

كقاعدة عامة، تلك ذات معامل تمدد حراري منخفض أقل عرضة للتقشر الحراري.

اختبار ثبات التغير الخطي عند إعادة التسخين:

يتم الاختيار في فرن المعمل باستخدام قطع من الطوب الحراري بحجم محدد (طبقا للمواصفات الدولية IS) والتسخين عند درجة حرارة معينة لمدة زمنية معينة (طبقا للمواصفات) ثم يتم تسجيل النتائج بطريقتين: (أ) التغير الطولي (ب) التغير الحجمي. لتسجيل النتائج بالنسبة للتغير الطولي، فإن طول العينة الأصلية يتم قياسه بواسطة الورنييه (vernier) وبعد التسخين يتم قياس الطول بنفس جهاز القياس. التعبير عن ثبات التغير الخطي يتم بالنسبة المئوية للزيادة/النقص في الطول كالآتي:

النسبة المئوية لثبات التغير الخطي عند إعادة التسخين (الطول) =

$$= \frac{\text{الزيادة/النقص في الطول} \times 100}{\text{الطول الأصلي}}$$

بالمثل في حالة الطريقة الحجمية، الحجم قبل وبعد الحرق يتم قياسه وتسجيل النتيجة كالآتي:

النسبة المئوية لثبات التغير الحجمي عند إعادة التسخين (الحجم) =

$$= \frac{\text{الزيادة/النقص في الحجم} \times 100}{\text{الحجم الأصلي}}$$

تعيين التغير الخطي الثابت: (Permanent Linear Change)*

قطعة اختبار من الطوب الحراري (الأبعاد $12,5 \times 5 \times 5$ سم) يتم قطعها بواسطة عجلة القطع من شكل حراري معين وتوضع في فرن به مجال مؤكسد. في حالة الأشكال الأصغر للحراريات، فإن العينة ذات الحجم الأكبر يتم قطعها بالطريقة التي تحافظ بها على أكبر عدد من الأوجه الأصلية لاختبار الحراري مع التأكيد على أن بناءها لم يحدث له تلف.

الوجه الأكبر لعينة الاختبار يوضع على حامل من الطوب الحراري مسحوبا من نفس الحرارية تحت الاختبار أو تلك التي لها نفس المقاومة الحرارية. يجب التأكد من عدم التصادم المباشر للهب على العينة من الموقد. يتم وضع الألومينا المنصهرة أو (kyanite) (للمنخل القياسي - 80 ميكرون) ما بين الحراري الحامل وقطع الاختبار. عند وضع أكثر من عينة اختبار في الفرن، فإنه يتم وضعهم بفواصل 4 سم بين كل منهم أو بعيدا عن جدار الفرن بنفس المسافة.

تسخين الفرن يتم طبقا لجداول الوقت. درجة الحرارة حسب نوع الحراري تحت الاختبار. بعد استمرار عينة الاختبار عند أقصى درجة حرارة مطلوبة لفترة زمنية معينة، يتم تبريدها لدرجة حرارة الغرفة لمدة 10 ساعات في الفرن المقلل نفسه. يتم قياس الزيادة في حجم عينة الاختبار ثانيا بعد أخذها من الفرن وإزالة القشور الصغيرة

من سطح العينة. يتم عندئذ حساب التغير الطولي على أساس التغير الحجمي بالعلاقات الآتية:

$$\text{النسبة المئوية للتغير الحجمي} \% = \frac{\text{الحجم النهائي} - \text{الحجم الأصلي}}{\text{الحجم الأصلي}} \times 100$$

أو النسبة المئوية للتغير الخطي (الطولي) = $\frac{\text{الطول النهائي} - \text{الطول الأصلي}}{\text{الطول الأصلي}} \times 100$ م

الجدول الآتي يوضح الجدول الخاص بالوقت - درجة الحرارة لبعض أنواع الطوب الحراري بجدول (٧).

الوقت منذ بدء التسخين	الطوب الحراري	سيليكا الحراري	حراريات السيليكا	الحراريات القلوية للخدمة العامة	حراريات العزل
١ ساعة	٧٥٠ - ١٠٠٠ °م	٩٠٠ - ١٠٠٠ °م	-	٧٥٠ - ٨٥٠ °م	٥٦٥ - ٩٦٥ °م
٢ ساعة	١١٥٠ - ١٣٢٥ °م	١٢٧٥ - ١٣٢٥ °م	-	١٢٧٥ - ١٣٢٥ °م	٧٧٠ - ١٣٠٠ °م
٣ ساعة	١٢٥٠ - ١٤٠٠ °م	١٣٧٥ - ١٤٠٠ °م	-	١٣٧٥ - ١٤٠٠ °م	٨٥٠ - ١٢٥٠ °م
٣,٥ ساعة	حتى ١٤٥٠ °م	استمرار لمدة ٢ ساعة إضافية	١٥٠٠ °م استمرار لمدة ٥ ساعة أخرى	١٦٠٠ °م استمرار لمدة ساعتين أخرى	استمرار ٢٤ ساعة أقصى ١٤٧٠ °م
٤ ساعة	١٥٠٠ °م استمرار لمدة ١ ساعة	-	-	-	-
٥ ساعة	١٥٥٠ °م استمرار لمدة ساعة أخرى	-	-	-	-
٦ ساعة	١٤٥٠ °م استمرار لمدات ٥ ساعات أخرى	-	-	-	-

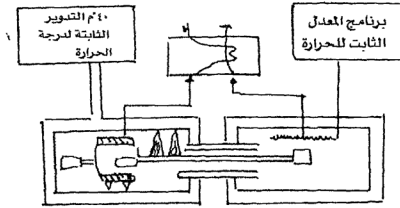
في اختبار ثبات التغير الخطي (الطولي) فإن مجمرة الفرن يجب أن تكون ذات درجة حرارة متجانسة والتي تقاس بواسطة ثيرمو كامل (pt-pt/Rh) حتى ١٤٥٠ °م وبوساطة

المقياس الحراري البصري (optical pyrometer). عند زيادة درجة الحرارة عن ١٤٥٠ م°. أقصى تغير في درجة الحرارة يجب أن يكون $\pm 10 - 15$ م° طبقاً ما إذا كانت درجة الحرارة المقاسة أقل أو أكبر من ١٤٥٠ م°. يتم تسجيل درجة حرارة الفرن كل ١٥ دقيقة لاستمرار ثبات درجة الحرارة. درجة حرارة إعادة التسخين النهائية لقطع الاختبار تتوقف على نوع الحراري وبالتالي مقاومته الحرارية كما هو موضح في الجدول السابق.

اختبار الطريقة التمددية (لقياس نقط تحول السائل بمراقبة تمدده) لثبات التغير الطولي:

(Dilatometric Method of PLC Test)

جهاز الاختبار بالطريقة التمددية المستخدم في قياس التغير الطولي في عينة الحراري مع درجة الحرارة موضح في الشكل (٣/١٠).



شكل (١٠) طريقة قياس التمدد الحراري

قطعة الاختبار الاسطوانية (بعد نظافة سطحها من الأتربة....الخ) من الحراري يتم وضعها ليكون أحد نهايتها على أنبوب حامل بحيث يكون الطرف الآخر حراً للتمدد. هذا الطرف الحر للقطعة يتم توصيله بقلب (core)، بمحول الإزاحة الإلكتروني للطاقة. يتم تسخين العينة وإي تغير في الطول يحرك الطرف الحر للقضيب السيراميك الذي يدفع قلب المحول والذي ينتج عنه انحراف يتم تسجيله بالمليفولت والذي يتناسب

مع التغير في طول العينة. تتم المعايرة القياسية للمحول (transducer) باستخدام عينة قياسية ذات معامل تمدد معلوم حيث من تعيين معامل التصحيح للتمدد الذي يحدث في الأنبوب السيراميك والحراري الحامل عن التسخين في نفس الوقت مع العينة. تحليل التمدد الطولي يساعد كذلك في تعيين التغيرات البنائية ونسبة المجالات المختلفة المكونة بسبب الانتقال بالتسخين والذي يشمل التغير في الحجم الكلي لعينة الحراري فمثلا النسبة المئوية في طوب السيليكا عند التسخين إلى درجة الحرارة المطلوبة من المكونات (Quartz, Tridymite, Cristobalite).

تأثير إعادة الحرق على ثبات الحجم:

Effect of Refiring on Volume Stability

أثناء حرق الحراري فإن الأداء والتغير الكيميائي والطبيعي يتوقف قبل أن يكتمل. أثناء حرق الطوب الحراري، مثلا، الأداء الذي يحدث ينتج عنه كمية معينة من الانكماش. إذا كان هذا الأداء غير كافٍ للاكتمال، فإن هذا الانكماش يمكن أن يستمر أثناء الاستخدام. إذا كان هذا الانكماش فيما بعد كبيرا، فإن طوب الفرن سوف تحدث له إزاحة، تفتيح للوصلات، والشقوق وكذلك التفكك. بالنسبة لمنتجات الطول الحراري، فإن الانكماش التالي بنسبة ١% بعد الحرق لمدة ساعتين وعند ١٤٠٠ °م يعتبر عاليا. درجة الحرارة الحقيقية التي عندها يجب اختبار الطوب والانكماش التالي (after-contraction) يتوقف على ظروف الخدمة في حالة طوب السيليكا، فإن معالجة الفرن تؤدي إلى التمدد، ولكن التفاعلات عموما تتوقف قليلا قبل أن تكتمل. أثناء الاستخدام عند درجات الحرارة العالية، فإن الكوارتز المتبقي يمكن أن يتحول إلى أشكال ذات كثافة أقل مع احتمال حدوث نمو. هذا النمو سوف يحدث حتى ضد قوى الضغط العالية لذلك فإن التمدد التالي لطوب السيليكا يجب أن يكون قليلا.

طوب الماجنيزيت ينكمش أثناء الحرق بسبب تبلور البيريكليز (periclase- MgO) مثل الماجنيسيا الأصلية اللا بللورية (amorphous). طوب الكروم وطوب الكروم الماجنيزيت يمكن أن ينكمش أو أن يتمدد. جو الفرن يلعب دورا خطيرا مع الطوب

المحتوي على خام الكروم. الحرق المناسب دائما يكون ضروريا لإمكان حدوث التفاعلات قريبا من الاكتمال ما أمكن.

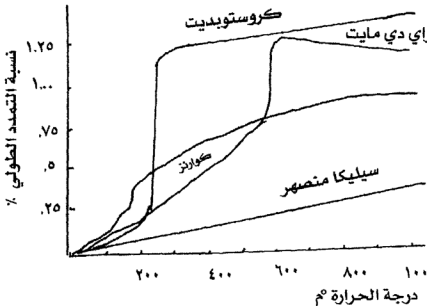
التمدد الحراري (Thermal Expansion)

التمدد الحراري العادي أو العكسي لمواد الإنشاء له مغزى معين حيث يجب عمل بعض التجاوز لاحتوائه في تصميم الفرن. التمدد الحراري للحراريات يعتبر عامل هام في تعيين مقاومتها للصدمة الحرارية.

عموما، التمدد الحراري أعلى قليلا من 1000°C . عند درجات الحرارة العالية، معظم الحراريات يحدث لها كمية معينة من الانهيار بسبب ليونة الرباط، وبعض التمدد يمكن عندئذ أن يحدث خلال الطوب نفسه.

الطوب الحراري له تمدد حراري متجانس حتى 1000°C ، وهذا عموما يكون في حدود $\geq 0.5\%$ أو أقل. طوب السيليكا سلوكه يختلف إلى حد ما.

طوب السيليكا يبين كل من تلك عدم الاستمرارية في منحنى تمددها الحراري، كما هو موضح في الشكل (٣/١١).

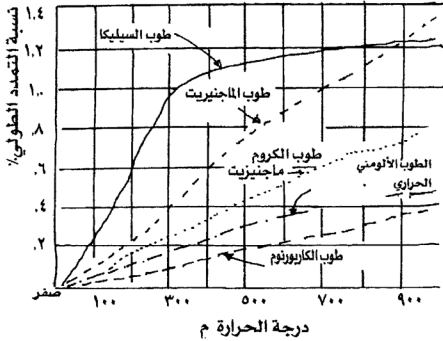


شكل (١١) تمدد طوب السيليكا

منحنى اختبار التمدد الحراري لطوب السيليكا، أو للمنحنى المرتبط بمعامل التمدد مع درجة الحرارة، يعطي بيان جيد عن مكونات الطوب. التمدد الحراري الكلي لطوب السيليكا ما بين صفر °م و ١٠٠٠ °م عادة يكون من ١,٢ - ١,٣ %.

التمدد الحراري لطوب الماغنيزيت. مرتفع بالمقارنة، من ١,٣ - ١,٤ %، وذلك لطوب الكروم أو لطوب الكروم الماغنيزيا فإن الطوب يكون أقل كثيرا عدا في حالة الجو المختزل. السيليمانيت له تمدد حراري منخفض حوالي ٠,٥ عند حتى ١٠٠٠ °م.

طوب السيليكون كاربيد هو بنفس الدرجة ولكن التمدد الحراري لطوب الكورندم أعلى (حوالي ١%)، التغير في التمدد الحراري لبعض أنواع الطوب الحراري طبقا لدرجة الحرارة مبين في الشكل (٣/١٢).



شكل (١٢) التمدد الطولي العكسي للحراريات

سمك وصلات الطوب يتأثر طبقا لخواص كلا من الطوب ومونة الرباط، ونوع الرباط المستخدم، والتجاوز المستخدم للتمدد الحراري للطوب. أحيانا في استخدامات خاصة لا

تستخدم مونه رباط. ولكن مونة الرباط يجب أن تكون رقيقة ما أمكن ذلك.
التمدد الحراري العادي والتجاوزات للطوب الحراري موضح في الجدول الآتي:

جدول التمدد الحراري والتجاوز للطوب الحراري:

نوع الطوب	التمدد الحراري العادي (مليمتر/) المتري عند درجة حرارة التشغيل	سماح التمدد للمتر عند درجة حرارة التشغيل
الطوب الحراري	٧,٨١	٠,٧ مليمتر
عالي الألومينا ٥٠-٨٠% ألومينا	٧,٨١	٠,٧ مليمتر
عالي الألومينا بأكثر من ٨٠% ألومينا	١٠,٤٢	١ مليمتر
السيليكا	١٣,٠٢-١٥,٦٣	١,٣ مليمتر
طوب المانجيزيت وطوب المانجيزيا-كروم (المحروق)	٢٠,٨٣	١,٩ مليمتر
طوب الكروم- المانجيزيا (الربط الكيميائي)	١٨,٢٣	١,٧ مليمتر

المواد المستخدمة لملى وصلات التمدد هي إما أن تكون قابلة للاحتراق أو اللانضغاط.
التمدد الرأسي في الحوائط يسمح لها للارتفاع لأعلى بحرية، بينما التمدد الأفقي يراعى بتوفير وصلات التمدد الرأسي. المنشأ المعدني المستخدم لاحتواء الفرن يحدث له تسخين ولكن بدرجة أقل كثيرا، بسبب درجة الحرارة المنخفضة نسبيا مقارنة بالطوب الحراري. وصلات التمدد المتوفرة في الحوائط الحرارية يتم ضبطها لاحتواء التمدد للإنشاء المعدني. التجاوز والاستعداد المسبق للتمدد الحراري للطوب الحراري يختلف طبقا لأبعاد الحائط، معامل التمدد الحراري للحرايات، ومعامل التمدد الحراري للمنشأ المعدني، نوع العزل المستخدم، طبيعة مونة الرباط، وظروف التشغيل.

رغم أن وصلات التمدد المناسبة يجب توفيرها، فإنها يجب ألا تزيد عن حد الأمان، بما يضعف المنشأ. التمدد الحراري الطولي (عند ٥٤٠ °م) لبعض مواد الإنشاء مثل الحديد الزهر، الأسمنت البورتلاندي والصلب (٠,٢ % كربون) هي على التوالي

٠,٨٢ ، ٠,٦٧٥ ، ٠,٨٧٥ .

النفاذية (Porosity)

النفاذية الظاهرية هي قياس حجم المسام المفتوحة، التي يمكن أن يتخلل خلالها السائل، كنسبة من الحجم الكلي. وهذه خاصية هامة في حالة التصاق الحراري بالخبث المنصهر. النفاذية الظاهرية المنخفضة مطلوبة ذلك لأنها تمنع سهولة الاختراق لحجم الحراري واستمرار المسام سيكون تأثير هام على سلوك الحراري. يفضل عدد كبير من المسام الصغير. بعدد مكافئ للمسار الكبيرة. ولكن، قياس المسامية الحقيقية الذي يأخذ في الاعتبار المسام المقفلة، يوفر فكرة مقبولة لشكل المادة، وكذلك خواص التخميص.

تعيين النفاذية:

في مادة الحراريات الخام الخضراء تكون كل المسام مفتوحة والسيول يمكن أن تمر خلالها. عند حرق هذه المواد يحدث تكون لبعض من السائل بسبب حدوث الانصهار ونتيجة لذلك فإن بعض المسام يتم قفلها. المسامية الظاهرية لذلك تأخذ المسام المفتوحة وليس المسام المقفلة. المسامية الحقيقية تعرف بالآتي:

$$\text{المسامية الحقيقية} = \frac{\text{حجم المسام المفتوحة} + \text{حجم المسام المقفلة} \times 100}{\text{الحجم الخارجي}}$$

$$\text{المسامية الظاهرية} = \frac{\text{حجم المسام المفتوحة} \times 100}{\text{الحجم الخارجي}}$$

طريقة نقطة الغليان:

المسامية الظاهرية لعينة صغيرة نظيفة (مقاس $6,5 \times 6,5 \times 4$ سم) يتم قياسها بعمل ثلاثة أوزان. الأول هو العينة الجافة، والثاني العينة المشبعة المغمورة في الماء والثالثة العينة المشبعة العالقة في الهواء. للتأكد من أن العينة مشبعة تماماً فإنه يتم غليها في الماء لمدة ساعتين. النفاذية الظاهرية تحدد من هذه الأوزان بواسطة المعادلة:

$$100 \times \frac{D - W}{A - W} = \% \text{ نسبة النفاذية الظاهرية}$$

حيث:

W = وزن العينة المشبعة في الهواء.

D = وزن العينة الجافة في الهواء (مجففة عند ١١٠ °م في فرن)

A = وزن العينة المشبعة المغمورة في الماء.

تعيين المسامية الكلية (بما فيها المسامية المقفلة) يتم بطحن العينة جيدا لتفتيح كل المسام وقياس الكثافة الحقيقية (بطريقة - pyconometer). إجمالي المسام يتم حسابه بالآتي:

$$P = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \times 100$$

حيث:

d_1 = الكثافة الحقيقية.

d_2 = الكثافة الكلية.

P = نسبة المسام الكلية بالنسبة للحجم الكلي $100 \times$

تعيين المسامية الظاهرية بالتفريغ أو بطريقة المجفف المفرغ:

عينة اختبار نظيفة من الحراري (بحجم ٦,٥ × ٦,٥ × ٤سم بعجلة القطع من قلب الشكل الحراري لاختبارها) يتم تجفيفها عند ١١٠ °م في فرن إلى الوزن الجاف (D) مع المحافظة على الدقة ٠,١ جرام. العينة الجافة يتم وضعها في مجفف تفريغ خالي (empty dry desicator) والذي يتم تفريغه إلى ضغط أقل من ٢٥ مليمت زئبق. يتم تغطية عينة الاختبار بواسطة سائل غمر (ماء أو جزء من سائل البرارافين المغلي عند درجة حرارة أعلى من ٢٠٠ °م). يستمر وضع العينة تحت الضغط المنخفض لمدة ٥ - ٦ ساعة حيث بعد ذلك يسمح بدخول الهواء على المجفف. عينة الاختبار المعلقة في

حبـل أو في شبكة حبـال يتم وزنها (s) بينما تظل عالقة في سائل الغمر .
يتم عندئذ رفع عينة الاختبار ببطء من سائل الغمر بواسطة خيط التعليق. نقات السائل على السطح يتم إزالتها بواسطة الالتصاق الخفيف مع قطعة من الورق النشاف مع التأكد من عدم التصاقها مع سطح العينة نفسه. العينة المشبعة (soaked) يتم عندئذ وزنها (s) بينما تظل عالقة في الهواء. النفاذية الظاهرية (P) يتم عندئذ حسابها بالمعادلة:

$$P = \frac{W - D}{W - S} \times 100$$

من الصعب الحصول على قيمة نموذجية للنفاذية لمختلف أنواع الطوب الحراري حيث يتوقف ذلك على معايير كثيرة. نفاذية الطوب الحراري قد تتراوح ما بين ١٢ - ٢٥% أو أكثر، تلك لطوب السيليكا من ٢٠ - ٣٠%.

الكثافة الكلية/ الجاذبية النوعية

Bulk Density Specific Gravity

الصفة المفيدة للحارايات هي الكثافة الكلية، والتي تعرف المادة الموجودة في حجم معين. زيادة الكثافة لحراري معين يزيد من ثباتها الحجمي وطاقتها الحرارية، وكذلك مقاومة اختراق الخبث.

تعيين الكثافة الكلية:

كثافة أي حراري يتم قياسها بالمعادلة:

$$\text{الكثافة} = \frac{\text{الوزن الكلي}}{\text{الحجم الكلي}}$$

يتم قياس الكثافة باستخدام طريقة القياس المباشر أو طريقة القياس المباشر للحجم.

طريقة القياس المباشر:

عينة الاختبار المستطيلة للحراري يتم وزنها بدقة (إلى أقرب ٥٠ جرام) وتسجيل

أبعادها باستخدام مسطرة قياس لحساب حجمها. يتم حساب الكثافة الكلية باستخدام المعادلة:

$$B = \frac{W}{V}$$

حيث:

B = الكثافة الكلية للطوب جرام / سم³

W = وزن عينة الاختبار بالجرامات.

V = حجم عينة الاختبار سم³.

طريقة القياس المباشر للحجم:

عينة الاختبار للحراري بمقاس $6,5 \times 6,5 \times 4$ سم يتم نظافتها من الأتربة العالقة. يتم تسجيل وزنها الجاف (D) (وذلك بعد تجفيفها عند 110 °م في فرن تجفيف إلى الوزن الجاف بدقة حتى 0,1 جرام). يتم عندئذ وضع العينة الجافة في مجفف التفريغ حيث يتم التفريغ إلى ضغط أقل من 25 ملليمتر زئبق. يتم عندئذ تغطية العينة بسائل غمر (ماء أو البارافين السائل المغلي عند درجة حرارة أعلى من 200 °م) ويظل تحت الضغط المنخفض لمدة 5 - 6 ساعة حيث يلي ذلك دخول الهواء إلى المجفف. الوزن العالق لعينة الاختبار (S) يتم تعيينه بإمسакها في خيط أو شبكة من الخيط بينما تظل عالقة في سائل الغمر. يتم عندئذ رفع العينة ببطء من سائل الغمر بواسطة الخيط. الوزن المشبع (W) لعينة الاختبار يتم تعيينه بوزن العينة المشبعة (بعد إزالة نقيط السائل من سطح العينة بواسطة ورق نشاف) وهي عالقة في الهواء. يتم عندئذ حساب الكثافة الكلية بالآتي:

$$B = \frac{D}{W - S}$$

طريقة القياس المباشر للحجم (عادة تستخدم للحراريات الغير منتظمة) لإعطاء نتائج أكثر دقة عن طريقة القياس المباشر (تستخدم للأشكال الغير منتظمة للحراري فقط).

هذه واحدة من البيانات لتقييم الاعتبارات النوعية لطوب معين. الجاذبية النوعية الحقيقية لمادة مكون الطوب المميزة من الكثافة الكلية للطوب ككل (بما فيها مساحات المسام) ذات أهمية خاصة لطوب السيليكا فقط وطوب الماغنيزيت. هذا يرجع إلى ثبات مكونات لأنواع الطوب الأخرى غالباً.

أنواع معينة من السيليكا لها جاذبية نوعية مختلفة، الكوارتز له جاذبية نوعية ٢,٦٥ ، الكريستوبالايت ٢,٣٣ ، التيراي ديمائت ٢,٢٨. لذلك فإن الجاذبية النوعية لطوب السيليكا هي دليل جيد لدرجة التحول. لذلك فإن طوب السيليكا ذو جاذبية نوعية ٢,٤٥ من الواضح أنه يحتوي على كمية كبيرة من الكوارتز الذي لم يتم تحويله والذي يمكن أن يسببه النمو المستمر أثناء الاستخدام. الجاذبية النوعية لمعظم طوب السيليكا تقع ما بين ٢,٣٢ إلى ٢,٣٦ بما يبين تحول الكوارتز إلى الكريستوبالايت، التيراي ديمائت. حقيقة أن كثافة الماغنيزيا (magnesia) تزداد مع المعالجة الحرارية، استخدمت كطريقة لتقييم ملائمة لهب الفرن لطوب الماغنيزيا. طوب الماغنيزيا الذي فيه بللورات الماغنيزيا (periclase) تم تنميتها تماماً تمتلك على أقصى جاذبية ٣,٦٥. ولكن هذا الرقم لطوب الماغنيزيا مرتفع قليلاً ويلزم تطويره طبقاً للمكون الكيماوي للطوب الماغنيز، المحتوى العالي من أكسيد الحديد ومن السيليكون يخفض القيمة الحقيقية. الجاذبية النوعية للطوب الحراري ذات أهمية قليلة بسبب الطبيعة المعقدة للمادة.

تعيين الجاذبية النوعية الحقيقية:

واحد جرام من مسحوق مادة الحراري الجافة (رقم منخل أقل من ١٠٠) يتم وزنها في قنينة مقياس الثقل النوعي (pycnometer) التي تم معايرتها ووزنها. يتم ملء نصف الوعاء بماء عذب مقطر مغلي ووضعها لمدة نصف ساعة عند ٦٠ °م ثم تقليب المحتوى لبلل الحبيبات جيداً وإزالة الهواء المحتجز. القنينة يتم وضعها عندئذ في تفريغ مناسب لتأكيد هروب كل الهواء. يتم عندئذ ملء القنينة إلى العلامة بماء مقطر ووضعها في حمام درجة حرارة ثابتة لمدة ساعة. يتم تغطية القنينة، الأنبوب الشعري

وخارج التقنية يتم مسحه لنظافته ثم يتم وزن الكل. الجاذبية النوعية يتم حسابها من المعادلة:

$$Sp.Gravity = \frac{W - P}{(W_1 - P) - (W_2 - W)}$$

(الجاذبية النوعية)

حيث:

P = وزن مقياس النقل النوعي والسداده

W = وزن مقياس النقل النوعي والسداده والعينة

W₁ = وزن مقياس النقل النوعي والسداده مملوءة بالماء.

W₂ = وزن مقياس النقل النوعي والسداده والعينة والماء.

يستفاد بمادة (tetrochlorocthane) بسبب لزوجتها المنخفضة وخاصية البلل العالية لأنه سيتم استبعاد خطوات الغلي وإزالة الهواء.

بعض البيانات عن الجاذبية النوعية والكثافة الكلية للحراريات في الجدول الآتي:

جدول:

نوع الطوب الحراري	الجاذبية النوعية الحقيقية	الكثافة الكلية جرام/سم ³
السيليكا	٢,٢ - ٢,٤	١,٧ - ١,٩
الطوب الحراري	٢,٦ - ٢,٧	١,٩ - ٢,١
البوكسايت	٣,١ - ٣,٤	١,٨ - ٢,١
الماجنيزيت	٣,٥ - ٣,٧	٢,٧ - ٣,٠
الكروم	٣,٧ - ٤,٢	٢,٨ - ٣,٥
الزركونيا	٤,٨ - ٥,٩	٤ - ٤,٦
الكربون	٢,٧ - ٣,١	١,٩ - ٢
السيليمانيت	٣,٠ - ٣,٢	٢,٠ - ٢,٢
السيليكون كاربيد	٣,١	٢,٢

النفاذية Permeability

تدفق الغاز خلال حائط الحراري يعتبر هام في كثير من الأفران، خاصة في حالة وجود اختلاف كبير في الضغط، كما في حالة أنواع التدوير. كذلك فإن النفاذية لبعض الأجزاء مثل انابيب المزدوجة الحرارية (thermocouple)، والأفران اللافحة (حيث الإحماء الخارجي - muffles)، والمسترجعات التي تسمح باستغلال حرارة الفرن المنصرفة (repuccerators).

تستخدم النفاذية لمراجعة التصنيع، حيث الفراغات، الرقارق والنقط اللينة تظهر في اختبار النفاذية. في حالة عازلات الحرارة تفيد هذه الصفة في إظهار الثقوب المتصلة داخليا.

مسامية الطوب الحراري لها علاقة قليلة مع النفاذية والتي هي قياس لمعدل تسرب وانتشار السوائل والغازات خلال الحراري. النفاذية تحكم طبقاً لحجم وعدد الثقوب المتصلة/القنوات المتصلة من جانب الحراري إلى الجانب الآخر. تزداد نفاذية السوائل مع زيادة درجة الحرارة كما أن لزوجة السوائل تقل حيث الظروف عكس حالة الغازات التي تزداد لزوجتها عند درجات الحرارة العالية. نفاذية الحرارية هامة في بعض الاستخدامات مثل تبطين الفرن العالي حيث يمكن أن يحدث تحلل للحراريات نتيجة الاحتراق بواسطة أول أكسيد الكربون وما يلي ذلك من ترسيب ثاني أكسيد الكربون $(2CO = C + CO_2)$ خلال الطوب.

قياس النفاذية:

النفاذية المطلقة هي صفة الحراري، ولا تعتمد بأي طريقة على السائل. يعبر عنها بالآتي:

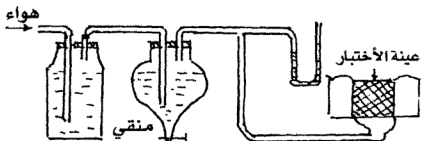
النفاذية المقاسة "K" عادة تقاس بالهواء عند درجة حرارة الغرفة) ويعبر عنها بالمعادلة الآتية:

حجم الغاز × طول المسار حيث ليس لها الأبعاد = المساحة
المساحة × الزمن × فرق الضغط
 ويعبر عنها سم³/سم. سم. الثانية × سم² من الماء.

تعيين النفاذية:

النفاذية هي قياس للمعدل الذي يمر به سائل خلال مادة مسامية ويرمز لها بالحجم (سم³) من الغاز أو الهواء الذي يمر خلال ١ سم². مكعب الحراري عند فرق في الضغط (جرام/سم²) في الدقيقة. الحراريات المعرضة للاتصاق المباشر بالغازات/السوائل يجب أن تكون مانعة للنفاذية لمنع حدوث تسرب للغازات واختراق السوائل خلال الحوائط الحرارية للفرن.

في جهاز تعيين النفاذية الموضح في الشكل (١٣/٣) يتم تمرير الهواء النقي خلال عينة مكعبة للحراري ذات مساحة سطحية معلومة وسمك معلوم، ويتم تثبيتها في ماسك مع إحاطة بالزئبق (seal). حجم الهواء الماء في وحدة الزمن يتم تسجيله. الفرق في الضغط يتم قياسه بواسطة جهاز المانوميتر لقياس الضغط.



شكل (١٣) جهاز تعيين النفاذية

يتم حساب نفاذية عينة الحراري باستخدام المعادلة:

$$f = \frac{V \cdot T}{A \cdot T \Delta p}$$

حيث:

f = نفاذية عينة الحراري.

V = حجم الهواء المار خلال العينة سم³

T = سمك العينة سم.

A = مساحة مقطع العينة سم².

t = الزمن الذي استغرقه الهواء في المرور خلال العينة بالدقائق.

Δp = فرق الضغط خلال السطحين للعينة جرام/ سم².

منع هروب الهواء على طول الجانب يعتبر مشكلة بالنسبة لقياس نفاذية العينة. معدات الاختبار تحتوي على العينة (مكعب، اسطوانة، أو طوب) في وعاء مطاطي قابل للنفخ. يستخدم الضغط الكافي للحام الأطراف تماما. يتم قياس حجم تدفق الغاز بواسطة عداد قياسي لقياس الغاز (أو بإزاحة الماء) بينما يتم قياس الفرق في الضغط باستخدام جهاز مقياس الضغط للغاز أو السائل (manometer). بالنسبة لنفاذية التدفق، فإن زمن الاختبار يجب أن يكون لفترة زمنية طويلة ما أمكن للحصول على نتائج دقيقة وجيدة. الجدول الآتي يبين لقيم النفاذية لعدد من أنواع الطوب. القيم تم قياسها للتدفق على الثلاث محاور للطوب ولكن أعطيت هنا للتدفق مثنى الطرف (edgewise).

جدول:

متوسط النفاذية % f	متوسط المسامية %	نوع الطوب
٠,١١٧	٢٨	عالي الألومينا - ٦%
٠,١٨٣	١٩,٦	الطفل الحراري فائق الأداء
٠,١٠١	١٩,١	الطفل الحراري عالي الأداء
٠,٠٣٢	٢٠,٨	الموليت (mullite)
٠,٠٠٥	١٥,٠	الكروم مجنيزيا
٠,٠٠١	١٣,٥	الماجنيزيت كروم
٠,١٤٣	٢٤,٢	الماجنيزيت
٠,٤٦١	٣٠,٣	السيليكا، قياسي

$$f = \frac{Cm^3 \times C \dot{m}}{(SeC)(Cm^2 (gm / Cm^2))}$$

الرقائق أو عدم الانتظام الانشائي يؤثر على قيم النفاذية. كل طوب الطفل الحراري بالضغط الجاف له نفس النفاذية ولكن طوب السيليكا له قيم أعلى. الطوب المصنع بحجم أكبر من الكسر، أعلى ضغط للتشكيل وأعلى درجة حرارة حرق سيكون له نفاذية أقل إلى حد ما.

إجهاد الكسر على البارد (Cold Crushing Strength)

إجهاد الكسر على البارد للحراري المحروق ليس له أهمية كبيرة ولكنه يعمل كدليل لخواص أخرى مثل التزجيج (vitrification)، درجة حرارة الحرق، نقاء المادة. بالنسبة لطوب العزل، فإن الإجهاد يعين القدرة على تحمل التداول والتحميل. اختبار الكسر على البارد يبين قدرة الطوب على تحمل مشاكل الانتقال ويمكن أن يستخدم كمؤشر مفيد لمناسبة الحرق والبري بالإضافة إلى خواص أخرى مثل النفاذية والكثافة الكلية الخواص الميكانيكية (مثل إجهاد الكسر على البارد) للحراري التي يتم تعيينها عند درجة حرارة الغرفة يجب أن تستخدم بحذر كدليل للسلوك المحتمل للحراري عند درجات الحرارة العالية. نظرا لأن كل الطوب الحراري معرض لخدمات حرق الحمل كمثال إجهاد الكسر على البارد فإنه من المهم اعتبار ما إذا كان الطوب الحراري يمكن استخدامه لعمل بطانة معينة من عدمه.

تعيين إجهاد الكسر على البارد:

يتم القياس في جهاز اختبار الضغط. حجم معين من الطوب بأبعاد (حوالي ٩ بوصة × ٤,٥ بوصة) يؤخذ إلى الجهاز الهيدروليكي، توضع هذه العينة بين المكبس حيث التحرك بالضغط الهيدروليكي عند تشغيل الماكينة. مع نقطة تحمل الطوب للحمل فإن جهاز القياس للماكينة يعين الضغط الكلي بالطن، في كل دقيقة عند سقوط الطوب فإن المؤشر يعود إلى الصفر للعينة تحت الاختبار. قيمة إجهاد الكسر على البارد تظهر مقروءة على مقياس الضغط للماكينة. إجهاد الكسر على البارد للطوب الحراري يتم

باستخدام ماكينة اختبار قياسية ميكانيكية أو هيدروليكية. الحمل الذي يظهر عنده التشقق في عينة الاختبار يبين إجهاد الكسر على البارد للعينة. مساحة سطح التحميل يجب أن يساوي أو يزيد عن سطح عينة الاختبار. الحجم العادي لعينة الاختبار هو ٢٣٠ ملمتر مكعب للطوب القياسي عدا في حالة أشكال أخرى للحراري أصغر أو خاصة حيث تكون عينة الاختبار بحجم أصغر. كذلك يمكن استخدام عينة اختبار ٧٧ ملمتر مكعب. عينة الاختبار يتم وضعها بين ألواح من الأسبستوس الكثيف بسمك ٥ ملمتر عند تنفيذ الاختبار. اختبار إجهاد الكسر على البارد ذو أهمية خاصة في الأفران من نوع الفرن القائم والذي يشحن من أعلى ويفرغ من أسفل (shaft furnaces) حيث يكون حمل الشحنة مركزا بما يتطلب أن يكون الطوب قادرا على تحمل الحمل الآتي فوقه. الحراريات ذات الحبيبات الخشنة المسامية لها إجهاد كسر ضعيف، بينما الحراريات ذات الحبيبات الدقيقة لها إجهاد كسر جيد. إجهاد الكسر على البارد لبعض أنواع الطوب لمكونات معينة وذات نفاذية معينة موضح في الجدول الآتي:

نوع الطوب	المكون التقريبي %	المسامية الظاهرية %	إجهاد الكسر على البارد كجرام/سم ^٢
الماجنيزيا	MgO-93.6	١٩,٧	٦٢٠
Foseterite	MgO-50.3 SiO ₂ -29.5	٢٢,١	٣٣٧
الكروم ماجنيزيت	Cr ₂ O ₃ -25.9 MgO-34.2	٢٢,٤	٢٧٥
الكروم	Cr ₂ O ₃ -29.7 Al ₂ O ₃ -34.1	١٥,٨	٩٩٢
٩٩% ألومينا	Al ₂ O ₃ -91.2 SiO ₂ -7.3	٢١,٣	٧٠٦
٧٠% ألومينا	Al ₂ O ₃ -69.2 SiO ₂ -24.8	٢٢,٩	٦٢٣
السيليكا عالية الأداء	SiO ₂ -95.8 Al ₂ O ₃ -0.2	١٩,٦	٣٤٠

نوع الطوب	المكون التقريبي %	المسامية الظاهرية %	إجهاد الكسر على البارد كجرام/سم ²
السيليكا التقليدية	SiO ₂ -95.8 Al ₂ O ₃ -0.5	٢٢,٥	٢٨٢
سيليكا فرن الكوك	SiO ₂ -94.9 Al ₂ O ₃ -1.0	٢٥,٦	٢٨٩
الطبل الحراري عالي الأداء Stabilized zirconia كربيد السيليكون برباط من الطغلة	SiO ₂ -52.9 Al ₂ O ₃ -42.0	٩,٨	٨١٣
	(ZrO ₂ +H ₂ O)-93.8 CaO-4.0	٢٣,٢	٤٠٩
Stabilized zirconia كربيد السيليكون برباد من الطغلة	SiC-89.2 SiO ₂ -7.3	٩	٦٤٢
طوب السيليكا الحراري للمزل	SiO ₂ -92.5 Al ₂ O ₃ -0.9	-	١٢

مقاومة التقشر Spalling Resistance

يعرف التقشر بأنه كسر في الطوب الحراري للأسباب الآتية:

- السدراج في درجة حرارة الطوب بسبب عدم تجانس التسخين أو التبريد الذي يحدث الإجهادات المسببة للتلف.
 - الضغط في منشأ الحرارية بسبب تمدد الكل من ارتفاع درجة الحرارة مسببا تلف بفعل القص.
 - التغير في معامل الحراري ما بين الطبقة السطحية لجسم الطوب بسبب الاختراق السطحي للخبث أو التغيرات البنائية في الخدمة الناتجة عن القص للطبقة السطحية.
- النوع الأول يعتبر عموما أنه تقشر حقيقي و لكن هذا غير صحيح. إنه بلا شك التأثير الشائع في الحراريةات مثل السيليكا والماجيزيت والكروم، النوع الأول من التقشر يكون بسبب الخواص المرتبطة بالحراريات.
- النوع الثاني للتقشر يرجع إلى التصميم الغير جيد للفرن والحراري نفسه.

السنوع الثالث من النقش يمكن خفضه باستخدام طوب محروق عند درجات حرارة أعلى من درجة حرارة الاستخدام التالي وبمنع اختراق الخبث كلما أمكن ذلك. الإجهاد الميكانيكي واللدونة لهم تأثير محكم على مقاومة النقش. النقش الحراري (كما يتم ملاحظته من النقش الطبيعي والميكانيكي) يكون بسبب وجود إجهادات خلال جسم الطوب بسبب التغيرات في التدرج الحراري. حساب هذه الإجهادات ومقارنتها بأقصى قوة للمادة عند درجة الحرارة للاستخدام يؤدي إلى النتائج الآتية عند التسخين المفاجئ: الاستعداد للنقش = معامل التمدد

أقصى قص شد × الجذر التربيعي للانتشارية

$$\frac{\text{co. efficient of Expansion}}{\text{max imum Shearing Strain} \times \sqrt{\text{diffusivity}}}$$

عند التبريد المفاجئ:

الاستعداد للنقش = معامل التمدد

أقصى إجهاد شد × الجذر التربيعي للانتشارية

هذا يبين أنه لمقاومة النقش، فإن الطوب يجب أن يكون له معامل تمدد منخفض، قوة عالية، استعداد انتشار حراري عالي. هذه المتطلبات تتوفر في كربيد السيليكون، السيليمانيت ومعظم الطوب الحراري. طوب السيليكون له مقاومة منخفضة للنقش، أقل من ٦٠٠ م°، بسبب المعامل العالي للتمدد حتى درجة الحرارة هذه، أعلى من ٦٠٠ م°، يصير التمدد صغيراً ومتجانساً وتزداد مقاومة النقش. طوب الماغنيزيت له استعداد عالي نسبياً للانتشارية بالقوة، ولكن له معامل تمدد عالي كذلك. لذلك، طوب الماغنيزيت يقع ما بين طوب السيليكا وطوب الطفل الحراري بالنسبة للمقاومة للصدمة الحرارية.

النقش يحتمل حدوثه غالباً عند درجات الحرارة المنخفضة نسبياً. عند درجات الحرارة هذه يكون الرباط زجاجي ولا يلين لإجهاد التمدد، مع ارتفاع درجة الحرارة فإن

الرباط يصبح متغير الشكل ويقبل بعض من الشد. التقشر يحدث أساسا أثناء التسخين والتبريد للفرن. يجب الحرص أثناء التسخين والتبريد لأي فرن مبطن بطوب السيليكا أو بطوب الماغنيزيت. طوب الدولوايت يجب عدم تعرضه لجو الفرن، حيث مع تلك المنتجات يحدث نوع معين من التقشر عند التعرض لدرجة الحرارة العالية. هذا ينطبق على أفران من الحديد عند درجات الحرارة العالية، ولكن ليس لإعادة تسخين مجمرة الفرن.

في حالة الفرن المستخدم بطريقة متقطعة يمكن استخدام الطوب الحراري، السيليمانيت، كريد السيليكون كلما أمكن لذلك، الاختيار الصحيح يتوقف على وجود أو عدم وجود الخبث وطبيعته وعلى التكاليف.

تعيين مقاومة التقشر:

مقاومة التقشر يتم تعيينها بطريقتين قياسييتين وهما:

١. اختبار اللوحة (panel)

٢. اختبار المنشور الصغير.

اختبار اللوحة لمقاومة التقشر:

في هذا الاختبار يتم استخدام ١٢ إلى ١٤ قطعة اختبار من الحراري (بسمك ٦٥ - ٧٠ ملمتر، بطول ٢٣٠ ملمتر ويعرض ١١٣ ملمتر) بعد التجفيف (عند ١٥٠ °م) ووزن كل عينة بدقة يتم وضعهم في لوح الإطار بواسطة الكاولين أو أي مادة مناسبة (لهم نقطة انصهار لا تقل عن تلك لقطع الاختبار والتي لا تتفاعل معها). يتم ترقيم عينات الاختبار بطلاء من السيراميك على السطح الداخلي الغير معرض للتسخين. سمك الاتصال لعينات الاختبار في اللوح يجب أن يكون ≥ 2 ملمتر. يتم دعمه وإسناده بمادة عزل مناسبة لإمكان الفقد في الحرارة حوالي ٦٠٥ كيلو كالوري/م^٢/الساعة في ظروف التشغيل ومتوسط درجة حرارتها يجب أن تكون حوالي ٧٠٠ °م. يتم عندئذ التسخين المسبق لتجهيزه الإطار واللوح (في فرن لهب غاز/زيت) للمحافظة على متوسط درجة حرارة الوجه عند ١٦٠٠ °م لمدة ٢٤ ساعة. يتم

استمرار معدل التسخين للوصول إلى درجة حرارة ١٦٠٠ °م في ٤ - ٥ ساعة. بعد تمام التسخين المسبق، يتم تسجيل حالة عينات الاختبار مع أخذ صورة فوتوغرافية لسطح اللوح للتسجيل.

الألواح التي تم تسخينها المسبق بعد إزالة العزل يتم نقلها (بواسطة ترولي) إلى فرن آخر (الإشعال بالغاز/ الزيت) والذي يسمى فرن النقش حيث يتم تسخين عينات الاختبار للوصول إلى درجة حرارة ١٤٠٠ °م في ثلاث ساعات. أثناء التسخين يتم تغيير مكان اللوح عند ١٠٠٠، ١٢٠٠، ١٣٠٠ °م لتأكيد تجانس التسخين. يستمر التسخين عند ١٤٠٠ °م لمدة عشرة دقائق ثم يتم بعدئذ تبريد اللوح في عشرة دقائق أخرى باستخدام تيار من ضباب خليط البخار والماء بواسطة ماسورة رأسية ذات فتحة (٩٠ ملمتر × ٦٠٠ ملمتر) يتم دخول الهواء بمعدل ٤٠ متر مكعب في الدقيقة بينما الماء يدخل بمعدل ١١ لتر خلال الدقائق الثمانية الأولى للتبريد. ولا يستخدم ماء أثناء الدقيقتين الأخيرتين.

وحدة التبريد لديها وسائل حركة التارجح لتسهيل حركة الذهاب والعودة (١٢٥ مرة في ١٠ دقائق) فوق كل سطح اللوح. يتم تعريض عينات الاختبار إلى ١٢ مثل هذه الدورة للتسخين والتبريد ثم يتم إيقاف الفرن بعد ذلك. يتم تعريض اللوح إلى دورتين إضافيتين للتبريد بدون استخدام أي ضباب ماء. التبريد التالي يسمح بحدوثه خلال ليلة بعد فواصل الألواح ٢٥ سم وجها لوجه. يتم عندئذ إزالة عينات اختبار الحراري من اللوح ثم يتم إعادة وزن كل منها. يتم عندئذ إعادة تنظيمهم بالترتيب الذي كانوا به في لوح الاختبار وتم تصويرهم للمقارنة ما بين الصورة الأولى التي توضع الحالة الأصلية للحراريات. يتم تسجيل متوسط الفقد في كل اللوح. درجة الفقد في الوزن للحراريات تعطي مؤشر لمقاومة التقشر للحراريات.

اختبار المنشور الصغير:

في هذا الاختبار يتم قطع ثلاث قطع اختبار من الحراري من عينة الاختبار وطحنها

إلى أشكال المنشور بقاعدة مربعة ذات جانب ٥٠ ملمتر وارتفاع ٧٥ ملمتر في حالة الأشكال القياسية و ٥٠ ملمتر حلقات عالية يتم قطعها من أشكال أخرى (مثل النافورات، أو الأكمام....الخ).

بعد تجفيف الثلاث عينات اختبار، يتم وضعهم في فرن لافح بارد أو فرن شبه لافح ثم يتم التسخين المنتظم للوصول إلى ٤٥٠ °م في ثلاث ساعات في حالة حراريات السيليكا و ١٠٠٠ °م في ثلاث ساعات في حالة الطفل الحراري (fired clay)، حراريات السيليكية (siliceous) أو القاعدية. قطع الاختبار (التي تستمر عند درجة الحرارة هذه لمدة ٣٠ دقيقة) يتم إزالتها من الفرن (باستخدام زوج من الألسنة يتم تسخينها المسبق) ثم يتم تبريدهم لمدة ١٠ دقائق على أرض من الطوب في وضع خالي من الرياح. يتم اختبار عينات الاختبار بالنسبة لوجود شروخ، في حالة وجودها، يتم إعادتها في الفرن والاستمرار عند درجة حرارة الاختبار) لمدة عشرة دقائق ثم التبريد حتى زيادة الكسر في عينات الاختبار. الدورة التي يتم خلالها الظهور الأول للتشقق يتم ملاحظتها كذلك. عدد الدورات التي تتحملها عينة الاختبار قبل الكسر يتم أخذها كمقياس لمقاومة النقش للحراري.

خواص النقش لمختلف أنواع الطوب:

طوب السيليكا ليس جميعه مقاوم للنقش في مجال درجة الحرارة المنخفضة. ولكن بعد درجة حرارة التحول، يكون شديد المقاومة لمجال كبير في درجة الحرارة بسبب استواء منحنى التمدد في هذا المجال.

جدول:

نوع الطوب	المقاومة للتقشر
الطفل الحراري عالي الأداء، المنتظم	مقبول
الطفل الحراري عالي الأداء، المقاوم للتقشر	جيد
فائق الأداء، منتظم	جيد جدا
شبه السيليكا semisilica	ممتاز
عالي الأداء	ممتاز - جيد
سيليكا	ضعيف أقل من ٦٥٠ ° م وممتاز بعدها
كروم ماجنيزيا	متوسط إلى جيد
ماجنييت كروم	ممتاز
كربيد السيليكون	ممتاز
الكربون والجرافيت	ممتاز

طوب الكروم والماجنييت، بسبب معاملها العالي للتمدد الحراري، فإنها غير مقاومة للتقشر مثل طوب الطفل الحراري. طوب كربيد السيليكون له مقاومة ممتازة للتقشر. كما هو موضح في الجدول السابق.

التوصيل الحراري (Thermal Conductivity)

يعتمد التوصيل الحراري على المكونات المعدنية والكيميائية والمجال الزجاجي في الحراري ودرجة حرارة الاستخدام. رغم أن هذه الخاصية ذات أهمية متواضعة وذلك بالنسبة للكفاءة، إلا أنها هي التي تحدد سمك الطوب الحراري.

تتغير خاصية التوصيل الحراري عادة مع ارتفاع درجة الحرارة، في الحالات حيث يكون التوصيل الحراري مطلوباً خلال بناء الطوب الحراري، كمثال، الأفران اللاقة (muffles)، المسترجعات (recuperators). فلن الحراري يجب أن يكون له توصيل حراري عالي. التوصيل الحراري المنخفض يكون مطلوباً للمحافظة على الحرارة وذلك بتوفير العزل. بغرض توفير العزل الخلفي، والمحافظة على الحرارة ولكن في نفس الوقت زيادة الوجه الساخن وبذلك فإن الطلب على نوعية الحراري تزداد. طبقاً

لخواص الحراري المستخدم في الوجه الساخن، مثل طاقة التحميل العالية لدرجة الحرارة المرتفعة، قد يكون مطلوبا أن نوعية الحراري تزداد مع زيادة الحرارة بسبب العزل الزائد. الحراريات خفيفة الوزن ذات التوصيل الحراري المنخفض لها استخدامات كثيرة في أفران المعالجة الحرارية ذات درجة الحرارة المنخفضة إلى حد ما، حيث تكون وظيفتها الأولى هي المحافظة على الطاقة. وهو أكثر من ذلك في حالة الأفران ذات الأداء المرحلي (batch) حيث الطاقة الحرارية المنخفضة للمنشأ الحراري سوف تقلل من الاحتفاظ بالحرارة أثناء دورات التبريد والتسخين المتقطعة.

التوصيل الحراري لكل من الطوب الحراري وطوب السيليكا يزداد بزيادة درجة الحرارة. القيمة المحددة لقدرتهم على التوصيل الحراري تتوقف على التركيب البنائي، درجة الحرق وعوامل أخرى. نظرا لأن معدل الزيادة في التوصيل الحراري مع درجة الحرارة كثيرا لطوب السيليكا، فإن التوصيل الحراري لهذا النوع من الطوب عند درجة الحرارة العالية يكون أكبر من ذلك للطوب الحراري (fire bricks). زيادة درجة حرارة اللهب تزيد التوصيل الحراري لكل من طوب السيليكا والطوب الحراري.

الطوب الأكثر نفاذية، عموما له درجة توصيل حراري منخفضة، ولكن حجم وعدد المسام يعتبر هام كذلك حيث أن الانتقال الحراري يمكن أن يحدث عبر المسام بواسطة الإشعاع ويزداد عند درجة الحرارة العالية.

الحراريات المستخدمة في أفران الصهر يجب أن يكون توصيلها الحراري منخفضا لتأكيد أدنى فقد في الحرارة وزيادة كفاءتها حيث المسترجعات (recuperators) تحتاج حراري له انتقال حراري عالي لضمان أقصى انتقال حراري.

القيمة المتوسطة للتوصيل الحراري لبعض أنواع الطوب خلال مجال درجات الحرارة موضح في الجدول الآتي:

جدول:

نوع الطوب	التوصيل الحراري كيلو كالوري/ المتر في الساعة °م		
	°م ١٠٠	°م ٥٠٠	°م ١٠٠٠
الكورنم (الألومينا المنصهرة)	-	٣,٠١ ما بين ٦٥٠ - ١٢٥٠ °م	-
سيليمانيت	١,٣٦	١,٤٨	١,٤٨
طوب السيليكون كاربيد	-	-	٨,٦١ ± ٦,٨٨
طوب الكروم	٠,٣٧ ± ١,٤٨	٠,٣٧ ± ١,٤٨	٠,٣٧ ± ١,٤٨
طوب حراري	٠,١٢ ± ٠,٥٦	٠,١٢ ± ٠,٧٤	٠,١٢ ± ١
طوب الماغنيزيت	٠,٦٢ ± ٥,٥٨	٠,٦٢ ± ٤,٤٦	٠,٦٢ ± ٣,٤٧
طوب السيليكا	٠,٧٤	٠,٩٩	١,٢٤
طوب العزل	-	٠,٢٤	-

اختبار الكشط بالاحتكاك (A Brasion Test)

الحراريات المستخدمة في مجمرة الأفران أو في مكان آخر حيث المواد أو الأغراض تتزلق خلالها (كما في حالة الفرن العالي) يجب أن تكون ذات مقاومة جيدة للكشط والاحتكاك. كذلك فإن الحراريات يحدث لها تلف بفعل الحبيبات في الغازات سريعة التحرك. اختبار الكشط بالاحتكاك عند درجة حرارة الغرفة لا يحقق أي بيان عن سلوكها عند درجة حرارة التشغيل العالية.

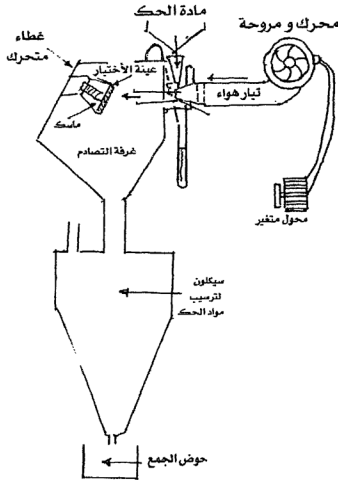
في أحد اختبارات الاحتكاك والكشط، يتم الحك لعينات الحراري معا داخل الفرن ثم تعيين الفقد في الوزن لفترة زمنية معينة من الاختبار. نموذج للنتائج موضح في الجدول الآتي:

جدول:

درجة حرارة الاختبار °م	الفقد في الوزن بالجرام
٢٠	٠,١١٥
١٠٥٠	٠,٢٥٥

يتضح أن مقاومة الكشط للاحتكاك تقل مع ارتفاع درجة الحرارة. البناء الدقيق للحبيبات ودرجة حرارة الحرق العالية يزيد من مقاومة البري بالاحتكاك. الطوب الذي له مقاومة جيدة للأحمال سوف يقاوم كذلك البري بالاحتكاك. مقاومة البرك بالاحتكاك لطوب العزل الحراري أقل عن تلك للحراريات الثقيلة. اختبار البري بالاحتكاك يتم لذلك بتدوير الحبيبات الصغيرة بواسطة الهواء عالي السرعة خلال ماسورة مبطنة بطوب معين.

رغم أنه توجد أعداد من طرق الاختبار، إلا أن طريقة (BS) لمؤشر مورجان - مارشال للبري يعتبر هام كما هو موضح في الجهاز المستخدم لهذه التجربة شكل (١٤/٣) الظواهر الهامة لهذا الاختبار هو زاوية التصادم لرمل الحك والبري (الألومينا المنصهرة أو مادة متشابهة) على عينة الاختبار، والتي هي ٤٥° م، الصلابة، الحجم (عادة رقم منخل - ١٠ + ٢٥ رقم منخل طبقاً لـ BS)، وكمية الرمال، وكذلك طبيعة كتلة الكربون التي يتم بها مقارنة عينة الاختبار. كل هذه المعايير في طريقة المواصفات الإنجليزية (BS)، إلا أن النتيجة التي يتم الحصول عليها هي فقط قيمة مقارنة.



شكل (١٤) مخطط لاختبار مؤشر الثبات للارشال - مورجان

المقاومة الكهربائية/ التوصيل الكهربائي

في الأفران الكهربائية، تكون المقاومة الكهربائية للحراريات ذات أهمية كبيرة، بينما في كثير من الحالات الأخرى، يكون المطلوب العزل الكهربائي عند درجات الحرارة العالية.

الجرافيت والمعادن موصلات كهربائية جيدة وخلاف ذلك. فكل الحراريات عازل كهربائي. الطوب الحراري لتبطين الأفران الكهربائية يجب أن يكون له توصيل كهربائي ضعيف جداً. الجرافيت (وهو مادة حرارية موصلة للكهرباء) يستخدم كأقطاب إما في الشكل المعدن ذلك أو تبطين للأفران الكهربائية ذات درجة الحرارة العالية. الحراريات

المسامية لها توصيل كهربائي ضعيف.
مقياس المقاومة عند درجات الحرارة العالية تصاحبها صعوبة خفض مقاومة الالتصاق.

المقاومة الكهربائية لبعض الحرارية التجارية موضحة في الجدول الآتي:

جدول:

نوع الطوب	المسامية %	المقاومة الكهربائية عند درجات الحرارة المختلفة أوم/سم		
		٨٠٠ °م	١٢٠٠ °م	١٤٠٠ °م
طوب حراري عالية الأداء	١٨	١٩٠٠٠	١٥٥٠	٧٢٠
عالي الألومينا (٧٠%)	٢٣	١١٨٠٠	٩٠٠	٤٦٠
المولاييت	٢٦	٢١٠٠٠	١٦٠٠٠	٧٢٠٠
الموليت المنصهر المسبوك	١٥	٢٥٠٠٠	١٧٠٠٠	٧٦٠
السيليكا عالي الأداء ٩٧%	٢٦	٣٦٠٠٠	١٠٥٠٠٠	٣٣٠٠
السيليكا ٩٠% SiO ₂	٢٢	١٥٠٠٠	٤٣٠٠٠	١٦٥٠
الكروم ماجنيزيت	١٤	١٤٥٠٠٠	١١٥٠٠	٦٨٠
الماجنيـزيت كروم	٢٩	٣٧٠٠٠	٢١٠٠٠	٣٦٠٠
الزركونيا	-	-	١٢٥٠	٣٠٠
الكربون	-	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣	-
الجرافيت	-	٠,٠٠٠٧	٠,٠٠٠٨	٠,٠٠٠٩

عند درجة الحرارة المنخفضة يكون التوصيل منخفض جدا للحراري. مع ارتفاع درجة الحرارة يزداد التوصيل بسرعة حتى الوصول إلى نقطة الانصهار حيث يحدث التوصيل الإلكتروني. في حالة المعادن النقية يكون التوصيل منخفض حتى نقطة الانصهار. ولكن في حالة الحرارية المتوسطة فإنه تتكون مجالات سائلة بفعل الملوثات عند درجات حرارة منخفضة نسبيا حيث يحدث انهيار مبكر للمقاومة. عموما، المادة النقية ذات درجة حرارة انصهار مرتفعة توفر أفضل مقاومة كهربية

عند درجة الحرارة العالية.

مقاومة الحرارية للأبخرة والغازات والخبث:

تحدث العدوانية على الحرارية بفعل المحلول الكيماوي للطوب، زائد البري الناتج عن حركة السوائل، والتفشر، الذي يلي التغيرات في درجة الحرارة. المواد البالغة الحد الأدنى من الانخفاض وهي المواد الأصهورية (eutectics) تتكون تفاعل حامض - قلوي أو بفعل مواد الإضافة لخفض درجة حرارة الانصهار (fluxes). الأصهور هو مركب من ماديتن أو أكثر تنصهر عند درجة حرارة أقل من أي من مكونات الخليط. رماد الفحم (coal ash) هو الحالة العادية المسببة للعدوانية على الحرارية بفعل حدوث الخبث. فهي تحتوي على SiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، FeO ، CaO ، MgO ، Na_2O ، FeS_2 . من هذه CaO ، Na_2O ، FeO و FeS_2 و FeS المسبب لأكبر درجة من العدوانية الكيماوية بإحداث الخبث (slagging).

في حالات ظروف الاختزال يتكون كلا من أكسيد الحديدوز، سلفيد الحديدوز والحديد. هذه تخفض نقطة الانصهار لحوائط الحارري وتذيب الطبقات الخارجية. كثيرا من الغازات والأبخرة الموجودة في جو الفرن لها تأثير مدمر على بناء الطوب الحارري. تحلل أول أكسيد الكربون الموجودة في $\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$ حتى عند درجات الحرارة المنخفضة (من ٤٥٠ - ٥٥٠ م°) والذي يساعد على حدوثه وجود أكسيد الحديد الحر ينتج عنه ترسيب الكربون عند وصلات الطوب وبذا يحدث إرباك للبناء الإنشائي للطوب. مثل هذا الطوب الذي يصبح رمادي يحدث له تشقق كما يسهل تفتيته. تخفيف أول أكسيد الكربون بثاني أكسيد الكربون (كما هو الحال في الغازات العادمة) يقلل بشدة استعداد التفتيت للطوب. بخار الماء له تأثير مدمر على الحرارية القاعدية ويقلل من درجة حرارة الانصهار للطوب الحارري وطوب السيليكا. الأبخرة القلوية في الغازات تخترق البناء الطوبي وتتفاعل مكونة مركبات ذات درجة حرارة انصهار منخفضة.

المقاومة لعدوانية أول أكسيد الكربون:

بالنسبة لهذا الاختبار يتم قطع عينتين من الحراري. يتم قطع أحدهما من مركز الحراري بينما العينة الأخرى يتم قطعها من الخارج لشكل حراري آخر. عينات الاختبار عادة تكون اسطوانية (بطول ٥٠ ملميمتر والقطر لا يقل عن ٣٠ ملميمتر)، ولكن يمكن قطعها كذلك في شكل مستطيل أو في شكل منشور.

لتعيين المقاومة لعدوانية أول أكسيد الكربون على الحراري، يتم وضع عينتين الاختبار في فرن ملفوف بسلك ذو حجم مناسب الذي يتم تطهيره بالنيتروجين النقي. يتم عندئذ تسخين الفرن إلى ٤٥٠ °م ثم أول أكسيد الكربون النقي (الذي ينتج بتفاعل CO_2 مع الفحم Char coal عند ١٠٠٠ °م أو أن يتم توليده من حامض الفورميك وحامض الكبريتيك) يتم تمريره خلال الفرن بمعدل ٢ لتر في الساعة. يستمر الاختبار لمدة ١٠٠ ساعة أو حتى تتلاشى عينات الاختبار. إذا ظهر ذلك مبكراً، يتم ملاحظة عينات الاختبار بانتظام بالنسبة لتغير اللون، ترسيب الكربون والتفكك الذي يحدث أثناء فترة الاختبار مع تسجيل هذه الملاحظات للعينتين. تستمر درجة الحرارة (٤٥٠-٥٠٠ °م) ومعدلات التدفق لأول أكسيد الكربون ثابتة خلال الاختبار. الوقت الذي بعده يحدث ترسيب للكربون أو التفكك يؤخذ كمقياس لمقاومة الحراري لعدوانية أول أكسيد الكربون. تأثير التفكك بفعل أول أكسيد الكربون يتوقف تحديداً على وجود أكاسيد الحديد في الحراريات.

أول أكسيد الكربون والنيتروجين المستخدم في هذا الاختبار يتم تنقية كل منها (إزالة ثاني أكسيد الكربون، الأكسجين، وبخار الماء) قبل الاستخدام ويتم قياس معدل التدفق لأول أكسيد الكربون باستخدام جهاز قياس الضغط (manometer) وجهاز قياس التدفق (flow meter) في خط الغاز قبل دخوله إلى الفرن.

قياس مقاومة الخبث (Slag Resistance)

اختبار الخبث يقيم مقاومة الحراري لاختراق الخبث. طرق الاختبار تقيس اختراق الخبث في الحراري، نقطة الانصهار لمسحوق الخبث والحراري عند خلطهما معاً

دراسة وصفية للخليط (petrographic study) من الخبث والحراري مع المعالجات الحرارية.

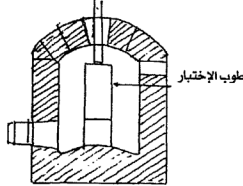
إجراء اختبار الخبث:

اختبار الخبث يتكون من تسخين طوبة واحدة أو عامود من الطوب إلى درجة حرارة متجانسة ثم إسقاط بودرة الخبث بانتظام من أعلى ويسمح لها للتحرك إلى أسفل في أخدود كما هو موضح في الشكل (١٥). العمق الذي تم به قطع هذا الأخدود عند نهاية الاختبار يعطي بيان جيد عن مقاومة الطوب للخبث، لأن الاختبار يتم في ظروف قريبة من ظروف الخدمة. رغم أن هذا الاختبار يعطي قيم ممتازة نسبياً، إلا أنه ليس اختبار كمي ولا يحافظ على استمرار التدرج في درجة الحرارة من سطح الخبث إلى السطح الآخر.

اختبارات رش الخبث Spray Slag Tests

اختبار آخر أكثر أهمية يتكون من رش مسحوق الخبث على الحراري الساخن. هنا يتم تغذية الخبث المسحوق خلال موقد دوار يصطدم على طوب الاختبار الموضوع داخل فرن أسطواني. لذلك، فإن كل الطوب يحصل على نفس المعالجة والتدرج في درجة الحرارة خلال الطوب تشبه لتلك الموجودة في الخدمة. في حالة عمل الاختبار لعدة أيام، يمكن الحصول على قيم كمية حقيقية.

أنبوب التغذية بالخبث



شكل (١٥) اختبار الخبث

التفاعل بين العزاريات المتصقة:

من المعروف فيه معرفة أقصى درجة حرارة آمنة التي عندها يمكن تسخين الحراري عند وضعه على حراري آخر. الجدول الآتي يوفر بعض البيانات بالنسبة للحراريات التجارية.

جدول لبيان أقصى درجة حرارة °م التي عندها يلتصق حرارين بدون تفاعل:

نوع الطوب	كروميت كروم	كروم	الومينا	%٩٠ الومينا	%٧٠ الومينا	طفل حراري عالي الأداء	كربيد السيلكون برباط من الطائفة	سيلكا	زركون
ماجنيزيت	١٧٠٥	١٦٥٠	١٧٠٥	١٥٩٥	١٣١٥	١٤٨٥	١٤٨٥	١٤٨٥	-
كروم	-	١٧٠٥	١٥٩٥	١٤٨٥	١٤٩٥	١٤٨٥	١٤٨٥	١٤٨٥	١٤٨٥
ماجنيزيت كروم	-	-	٢٥٩٥	١٤٨٥	١٤٨٥	١٤٨٥	١٤٨٥	١٥٩٥	-
٩٠% الومينا	-	-	-	-	-	-	-	١٥٩٥	١٤٨٥
طفل حراري	-	-	-	-	-	-	١٥٩٥	-	-
عالي الأداء	-	-	-	-	-	-	-	-	-
كربيد السيلكون	-	-	-	-	-	-	-	١٥٩٥	-
برباط من الطائفة	-	-	-	-	-	-	١٥٩٥	١٦٥٠	١٦٥٠
الومينا ٧٠%	-	-	-	-	-	-	١٥٩٥	١٥٩٥	-

نوع الطوب	كسروم ماجيزيت	كروم	%60 ألومينا	%70 ألومينا	طفل حراري عالي الأداء	كربيد السيلكون برباط من الطلقة	سيلكا	زركون
سيلكا زركون	-	-	-	-	-	-	-	-
١٦٥٠								
-								

اختيار معامل التالف Modulus of Rupture Test

تالف الطوب عمليا نادرا ما يأخذ شكل التفتت البارد. عموما استخدام عزم الإحناء حيث يتلف الطوب بالكسر إلى جزئين وليس بالتفتت. في اختبار معامل التالف (والذي يتم تنفيذه على ماكينة ضغط ميكانيكي أو هيدروليكي قياسية)، فإن عينة الاختبار (ذات أبعاد ٧٢ × ١١,٣ × ٦,٥ سم المقطوعة من الشكل المطلوب للحراري) يتم وضعها على أطراف التحميل الماكينة بفاصل ١٨ سم. يتم عندئذ استخدام حمل ثابت (بمعاد ١٠ كجرام في الدقيقة في حالة الماكينة الهيدروليكية) و ١,٢٥ كجرام في الدقيقة عند استخدام الضغط الميكانيكي عند منتصف العينة مع تسجيل الحمل الذي يحدث عنده تلف العينة. في حالة عدم وجود ماكينات هيدروليكية أو ميكانيكية فإن استخدام التحميل يجب أن يكون متجانس بدون اهتزازات.

معامل التالف (R) بالكيلوجرام/سم^٢ طبقا للمعادلة :

$$R = \frac{2WL}{2bd^2}$$

٣٧٧

حيث:

W = الحمل الكلي الذي حدث عنده كسر للعيينة (كيلوجرام)

L = المسافة بين الأطراف الحاملة (سم)

b = عرض العينة (سم)

d = سمك العينة (سم)

في نفس ماكينة اختبار الضغط المستخدمة في تعيين إجهاد الكسر على البارد، مع قليل من التعديل، يمكن عمل اختبار معامل التلف.

الفصل الثالث

3

الحراريات العازلة Insulating Refractories

الحراريات العازلة توضع في الفرن لخفض الفقد في الحرارة وبذا تعظيم ترشيد الطاقة. هذه الحراريات لها نفاذية عالية وتوصيل حراري منخفض. يستخدم الصوف الزجاجي وصوف الخبث (slag wool) كمادة عزل لدرجة الحرارة المنخفضة. شعيرات السيراميك، و صوف أو رغاوي السيراميك (foam ceramic) يستخدم في عزل درجات الحرارة العالية. الحراريات الأخرى للعزل الحراري يتم إنتاجها من الطفل الحراري، أو الأسبستوس.

استخدام حراريات العزل في الفرن تسهل:

- أقصى محافظة على الحرارة.
- خفض الفقد الحراري.
- أقصى كفاءة حرارية.
- أدنى استهلاك للوقود.
- درجة حرارة تشغيل عالية.
- ظروف تشغيل أفضل للعمالة.

- تقليل مشاكل تداول الوقود.
 - الصفات المطلوبة في حراري العزل الجيد هي:
 - المسامية العالية المتجانسة.
 - التوصيل الحراري الضعيف.
 - اختبار الكسر على البارد جيد بدرجة مناسبة.
 - قيم عالية لمعادل القمع الحراري (PCE) لتحمل درجة حرارة التشغيل.
- المنشأ عالي المسامية حيث الهواء الذي يحتجز عندئذ يقلل ذلك من طاقة التوصيل للحراريات ويزيد من خواص العزل لها ذلك لأن الهواء المحتجز عازل جيد. مواد العزل المستخدمة كمادة تقوية في الفرن تمنع التوصيل الحراري من منطقة التسخين خلال الحوائط الجانبية أو القاع بدون الحاجة إلى زيادة ضخامة إنشاءات الفرن. التوزيع المتجانس لفراغات المسام يؤكد أفضل خصائص العزل الحراري. يتم تطوير خصائص العزل بضبط النسبة ما بين حجم وعدد الحبيبات الصلبة وفراغات المسام وكذلك اختيار مواد أقل قدرة على التوصيل الحراري. لإدخال المسامية في حراريات العزل يتم وضع بعض من المواد الكربونية مثل نشارة الخشب في خليط الحراري والتي تحترق باللهب تاركة مساحات مسامية في المنتج الحراري. المسامية يمكن كذلك إدخالها بإضافة مادة متطايرة مثل مسحوق النفتالين أو كيمويات مثل فوسفات الكالسيوم، كلوريد الأمونيوم أو كبريتات الأمونيوم.... الخ. استخدام رقائق الخشب الصلب ينتج عنه كذلك زيادة حجم المسام.
- إنتاج الطوب الحراري ومواد العزل الأخرى يتطلب معالجة مختلفة. يقسم طوب العزل إلى قسمين - أحدهما للاستخدام عند درجات الحرارة المنخفضة أي أقل من ١٠٠٠ ° م. مواد العزل الأخرى هي شعيرات السيراميك ذات المكونات المختلفة للاستخدام في درجات الحرارة المختلفة.

طوب العزل للحرارة المنخفضة يصنع من حبيبات تقشر الزخارف الدودية (exfoliated vermiculite، قشور الميكا أو الدياتوب (وهذا طين صفحي من طحلب مجهري أحادي

الخلية وجدرانه مشبعة بالسيليكا (diatomite). عند استخدام أي من تلك المواد الخام التي تم ذكرها، فإنه تستخدم كمية جيدة من الحبيبات الكربونية في مكونات الشحنة والتي تحترق أثناء الحرق، تاركة فراغات داخل بناء الطوبة، والتي تساهم في خواصها في العزل. حبيبات تقشر الزخارف الدودية يمكن أن تستخدم لعمل الطوب والكتل بدون حرق وذلك باستخدام أسمنت هيدروليكي الشك في إنتاجها.

طوب العزل في درجات الحرارة المرتفعة ينتج من خليط من حبيبات الطفل المحمص أو الكيانيت (kyanite) المحمص أو الكيانيت الخام مع مواد كربونية قابلة للاحتراق في الشحنة. استخدام مادة قابلة للاحتراق يمكن تجنبه بتبني تقنية الرغوي أثناء تشكيل الأشكال. حالياً يتم إنتاج حبيبات فقاعة الألومينا فقاعة السيليكا لعمل كلا من منتجات العزل الحراري المقولبة أو الغير مقولبة، للاستخدامات عند درجات الحرارة العالية. قشر الأرز يعتبر مادة عزل هامة ومناسبة لدرجات الحرارة حتى ١٥٠٠ °م.

يستخدم جزء صغير من الطفلة اللدنة كرباط في طوب العزل لدرجات الحرارة المنخفضة والمرتفعة. يتم تشكيل الطوب عند ضغط منخفض أو حتى بالتشكيل اليدوي. يتم حرق طوب العزل الحراري عند درجة حرارة طبقاً للمادة الخام المستخدمة وكذلك درجة حرارة استخداماتها. ولكن درجة حرارة الحرق يفضل أن تكون أعلى من درجة حرارة استخداماتها.

يتم وضع حرايات العزل بواسطة المواد الأسمنتية العازلة من مكونات مشابهة لحرايات العزل نفسها مع التأكيد على أن تكون الوصلات رقيقة جداً.

الطفل الحراري من النوع (الدرجة) المناسبة هو الأكثر استخداماً كمادة عزل والتي يتم تجهيزها بخلط الطفل الحراري مع نشارة الخشب (المادة القابلة للاحتراق المستخدمة لتكوين المسام) ومادة ربط يليه تشكيل الخليط طبقاً للأشكال المطلوبة (باليد، أو البثق أو بالضغط الجاف)، والتجفيف والحرق (عند درجة حرارة ١٠٠ °م أقل من قيمة مكافئ القمع الحراري للطفل الحراري المستخدم). الغازات العادمة المنتجة نتيجة احتراق نشارة الخشب التي يتم طردها من الطوب الحراري ينتج عنها منتج خفيف له

البناء المسامي المطلوب. طوب العزل الحراري المنتج من الطفل الصيني (chinaclay) له قدرة مقاومة حرارية أعلى بينما المنتج من الأسبستوس رغم قلة توصيله الحراري إلا أن مقاومته الحرارية أقل مقارنة بطوب الطفل الحراري. الطفل الحراري يستخدم حتى ١٥٠٠ °م بينما يستخدم الأسبستوس حتى ٩٠٠ °م. التمدد عند التسخين يقلل من الكثافة (بحوالي ١٦%) وتفتت المادة بسبب التغير البنائي عند التمدد يتم تجنبه باستخدام مادة قابلة للاحتراق (مثل نشارة الخشب) والتي تحترق تاركة فراغات مسامية في المنتج. لعزل الأحماض الحامضية، يستخدم خليط من الطفل الحراري والكوارتز ونشارة الخشب لعمل العزل الحراري. حرايات العزل تكونها عالية المسامية وذات قوة منخفضة نسبيا تتطلب العناية عند التداول والتعبئة في الفرن والحرق لتجنب تفتتها.

الأثورثايت (anorthite) هي مادة حرارية صناعية خفيفة الوزن تصنع من الكاولين (الصلصال الأبيض) والجبس (بالصهر والصب) له خواص عزل حراري عالية، وله قوة عالية وكثافة ظاهرية منخفضة (٠,٥ جرام/سم^٣) ومناسب للاستخدام عند ١١٠٠ °م إلى ١٢٥٠ °م. وهذه تستخدم تحديدا في الوسط المختزل المحتوي على الكربون. المواد الصناعية عالية القوة (ذات المسامية المفتوحة حتى ٨٥%) يمكن إنتاجها بإضافة (PVC, Polystyrene, Polythene)....الخ. (أي مركبات مصنعة ذات وزن جزيئي عالي).

الصوف الزجاجي، الأسبستوس، رماد الخشب (slag wood) (في شكل شعيرة الصوف).....الخ في العزل حيث درجة الحرارة المنخفضة. يستخدم مسحوق الزركونيا ومسحوق الألومنيوم تستخدم لمنع الأفران المعملية. حيث الحشو المفكك للمسحوق ينتج عنه منشأ مسامي. المسحوق متجانس الأحجام يؤكد التوزيع المتساوي للماسحة الفراغية وبذا تحسن خواص العزل. مدخل الرأس العلوي لقالب الصب الذي يحوي مخزنا من المادة المنصهرة (hot top-insert) ذات كثافة من ٠,٨٥ - ١,٥ جرام/سم^٣ الذي ينتج من خليط حراري يحتوي على ٦٤ - ٨٠% من أكسيد

السيليكون، ٢ - ٢٠% كل من اللجنين ونشارة الخشب يستخدم كعازل حراري لمدخل قالب الصب (أي القمعة الساخنة) لكثا الصلب الخام وذلك للعزل الحراري الجانبي للصلب في الجزء المرتفع للقالب والذي يقلل الفاقد بالتخلص من الجزء العلوي. تستخدم الحراريات ذات القوة والمسامية الكافية في مراجعات (checkers) الأفران الاسترجاعية (regenerative furnaces) والتي تساعد في انتقال حراري أفضل واسترجاع أفضل. الغازات الساخنة التي تمر خلال المسام ترفع درجة حرارة حبيبات العازل الحراري وهذه الحرارة يتم استعادتها عند مرور تيار الهواء البارد خلال المراجعات في دورة اللفح (blast). كلما كان توزيع المسام متجانسا، كلما كانت كفاءة الحرارة المنتجة لهذه الحراريات أفضل.

الألواح ذات المحتوى العالي من صوف الألومينا تستخدم كمادة عزل في الأفران المستخدمة في عمليات طبع البيانات على الصلب، وفي وحدات الصهر والسبك لإنتاج سبائك الألومنيوم وفي الأفران المستخدمة في تجانس منتجات الألومنيوم شبه النهائية. ولها قوة عزل حرارية عالية (أكبر من ١٧٥٠ م°)، وتوصيل حراري منخفض (أقل من ٢٩ وات/ المتر عند ٨٠٠ م°) ويمكن استخدامها بأمان عند درجة حرارة تشغيل حتى ١١٥٠ م°. ولكن هذه المادة لها عيوب فقد الكهرباء أثناء التسخين ويحدث لها تغير في شكل الحبيبات بعد النقع لمدة طويلة عند ≥ 1000 م°. هذا بالإضافة إلى أن انخفاض لدونتها يمنع استخدام القرميد للأجزاء ذات الانحناءات الكبيرة. هذه السليبات لألواح العزل يتم التغلب عليها باستبدالها بشعيرات العزل (مثل شعيرات السيراميك) ومن حصائر اللباد.

شعيرة السيراميك (Cimamic Fibre)

تتسج شعيرة السيراميك من مواد مختلفة منصهرة مثل الألومينا، السيليكا، الزركونيا، التيتانيا، الثوريا (thoria)، أكسيد التانتالام (tantalum oxide)....الخ في شكل صوف، شعيرات قصيرة وشعيرات طويلة. يتم عندئذ تشكيل قماش الجوخ (cloths) والبطاطين

من هذه الشعيرات بمختلف الطول والعرض. بالمثل الورق واللباد يصنع كذلك من الصوف لاستخدامه كمادة عزل حرارية. لكونه خفيف جدا وعالي المسامية، فإن شعيرات السيراميك لها كفاءة عزل ممتازة لعزل درجات الحرارة العالية بالإضافة إلى ميزة خفض استهلاك مواد العزل بحوالي ٤٠ - ٦٠%. بخلاف خفض في الوزن الكلي للمنشأ، فإن تبطين الفرن بشعيرات السيراميك يقلل من استهلاك الوقود بشكل ملاحظ ويزيد من إنتاجيته. شعيرة طفل الصلصال (الكاولين) تحديدا تعتبر مادة شديدة التأثير كعازل حراري.

يصنع كثيرا من أنواع اللباد المصنع من شعيرة السيراميك بطريقة الدرفلة (الدرجة) والدمج للشعيرات المنتجة بصهر الألومينا والرمل في فرن كهربى وتشت المصهور إلى شعيرة بنفخها بواسطة البخار الحامل للكمية الضرورية من مادة الربط (مثل السيليكون) لتحثويه الشعيرة لزيادة القوة. اللباد المدمج يتم قطعه بواسطة اسطوانة سكاكين ويشكل في رولات (لفات) للاستخدام النهائي. اللباد من شعيرة الألومينوسيليكايت (كثافة ٠,٠٤٨ إلى ٠,١٢٨ جرام/سم^٣) تستخدم كطبقة عاملة لتبطين الأفران الصناعية عند درجة حرارة الخدمة ما بين ٨٠٠ - ٨٥٠ °م وسرعة صعود الغاز العادم ٩ متر في الثانية. بالمثل فإن اللباد العازل عالي الألومينا برباط السيليكون يمكن أن يتحمل درجة حرارة حتى ١١٥٠ °م حتى مع الاستخدام الطويل ويمكن أن يعمل كطبقة عاملة لتبطين الأفران الصناعية عند درجة حرارة الخدمة ٨٥٠ °م وسرعة الغاز العادم حتى ٥ متر في الثانية.

شعيرة السيراميك زاد استخدامها في أعمال العزل للمحركات النفائة وأفران الصلب للعزل الحراري بسبب قدرتها الفائقة على العزل وبساطة الاستخدام، التخزين المنخفض للحرارة، وخفة الوزن، وانخفاض التوصيل الحراري. هذه مواد عزل اقتصادية وذات كفاءة للأفران حيث لا يوجد الالتصاق مباشر مع المعدن المنصهر. مواصفات شعيرة السيراميك من نوعين موضحة في الجدول الآتي:

جدول:

المعايير	درجة (١)	درجة (٢)
المكونات $Al_2O_3\%$	٤٣ - ٤٧	٤٦ - ٤٨
$SiO_2\%$	٥٣ - ٥٧	٤٧ - ٤٩
$Fe_2O_3\%$	٠,٠٢ - ٠,٠٨	٠,٧ - ١,٢
$TiO_2\%$	٠,٠٢ - ٠,٠٥	١,٥ - ١,٩
الخواص الكثافة الكلية جرام/سم ^٣	٠,١٢٨	٠,١٢٨
قطر الشعيرة ميكرومتر	٢ - ٣	٣
نقطة الانصهار °م	١٧٦٠	١٧٦٠
درجة حرارة الاستخدام الآمنة	١٢٦٠	١٢٦٠
الطاقة الحرارية عند ٩٨٠ °م، كيلو كالوري/كجرام	١,٠٧	-
إجهاد الشد (MP's)	١٤٠٠	٩٦٠

معظم الشعيرات المستخدمة في أعمال العزل هي سيليكات الألومينيوم المنفوخة التي هي بيضاء زجاجية وغير بلورية. عملية إنتاج الشعيرات تختلف من منتج إلى آخر ولكن تتكون عموما من صب تدفق مصهور سيليكات الألومينيوم الزجاجية عند ٢٣٠٠ °م إلى مغزل دوار أو أمام تدفق عالي الضغط من الهواء أو البخار. كلاً التقنيتين تكسر التدفق إلى نقاط وتوفر عجلة عالية في هذه النقاط مسببة لهم تلطيف الشعيرات.

خواص وصفات الشعيرات:

قطر الشعيرة: متوسط قطر الشعيرة يتراوح ما بين ٢,٢ و ٣,٣ ميكرون يعطي توصيل حراري منخفض عند كثافة قليلة ومتوسط حرارة مرفع ولكن تأثيرها عند كثافة أعلى يكون قريبا من الحد الأدنى.

الخواص الحرارية:

شعيرات السيراميك لها توصيل حراري منخفض جدا والذي يقل مع زيادة الكثافة الحجمية (الكثافة الظاهرية للمسحوق السايب) للشعيرات ويزداد مع زيادة درجة

الحرارة بسبب نسبتها العالية من الهواء (٩٠%). التوصيل الحراري يكون مفضل في اتجاه الشعيرة لنسيج الشعيرة ويكون حوالي ٣٠% أعلى من الاتجاه العمودي. إشعاع كتلة الشعيرات، يمنع التيارات الموصلة، لذلك يظل يسمح فقط بكمية صغيرة من التوصيل الحراري. بالمقارنة مع المواد الحرارية التقليدية، فهي تبدي الانتشارية الحرارية التي تزداد بزيادة درجة الحرارة. الشعيرات لها معامل انبعاث حوالي ٠,٩٥. مقارنة لأقل من ٠,٧ للحراريات التقليدية.

طاقاتها الحرارية المنخفضة تعطي دورات تسخين وتبريد أسرع في الأفران التي تعمل لفترات. الشعيرات مقاومة كذلك للصدمة الحرارية. عند تسخين الشعيرات إلى حوالي ٩٨٠ °م. يبدأ عدم التزجيج (devitrification) والذي يسبب الانكماش، وفقد في القوة والكسر. عند ١٢٦٠ °م إلى ١٣١٥ °م فإن الانكماش يزداد سريعا أقصى انكماش طولي من ٢,٥ - ٣% بعد التسخين لمدة ٢٤ ساعة هو قيمة حقيقة لتصنيف درجة الحرارة. كمية الانكماش لها تأثير مباشر على الثبات الحراري.

الكثافة المنخفضة للشعيرات تساعد على استخدام الأحمال الإنشائية ذات الوزن الخفيف. وهي مقاومة إلى حد ما للصدمات الميكانيكية وللاهنزات. مقاومة الاحتكاك لنسيج الشعيرات ضد الغازات يمكن تحسينه بالإنشاء المعياري (modular). تشبع السطح لبطانة الشعيرات بمادة تصلب ولحام (مثل silicasol) واستخدام طبقة حماية (الزنك أو الزركون) يحسن مقاومة البري.

أنواع منتجات الشعيرة:

يصنع العديد من المنتجات من الشعيرات مثل اللباد، غطاء، أشكال معدة بالتفريغ، ورق....الخ. اللباد أو الحصير عادة تلتصق في لفائف أو أفرخ مسطحة التي مثلها تمتلك قوة جيدة على البارد. تختلف الأغشية (blankets) عن اللباد لكونها غير عضوية تماما وتصنع بعملية اللصق الذاتي.

مميزات إنشائية الشعيرة خفيفة الوزن:

الفوائد الناتجة من تبطين الأفران بالشعيرة هي كالاتي:

- بطانة الشعيرات أخف في الوزن.
- بطانة الشعيرات تختزن حرارة أقل.
- يمكن استخدام منشأ من الصلب خفيف الوزن.
- انخفاض سمك الجدار يزيد من طاقة الفرن.
- تحسين التحكم في الفرن.
- دورات التسخين والتبريد قصيرة.

تقنيات إنشاء الشعيرة:

عموماً، توجد ثلاث طرق لتبطين شعيرة السيراميك في الأفران وهي:

- ورق الحائط (wall papering)
- الإنشاء المعياري (modular)
- تلبيس بطبقة أو قشرة خارجية (veneering)

الإنشاء بطريقة ورق الحائط:

وهذه تشمل لحام دعائم معدنية قائمة (studs) أو ألواح تثبيت مع ألواح دعائم التقوية ثم يطوق طبقات من شعر العزل فوق هذه الدعائم حتى الوصول إلى السمك المطلوب للعازل. طبقات الوجه الساخن يجب أن تكون إما منفردة أو متطابقة لمنع اختراق الغازات الساخنة خلال الوصلات. يمكن استخدام عزل احتياطي (أو ساند) أقل تكلفة بهذه الطريقة. مسامير التثبيت المعدنية لدرجة حرارة حتى ١٢٣٠ °م يتم لحامها مع الغلاف المعدني للفرن بفواصل ثابتة. بعد تطويق غطاء الشعيرات ، يتم تأمينها بواسطة جوانات مسامير التثبيت. عند أعلى من ١٢٣٠ °م تستخدم مسامير التثبيت المعدنية. في أحد الأنظمة يتم لحام سبيكة الدعامة بغلاف الفرن مع قلوطة مسمار من السيراميك (corundum) فوق الدعامة المعدنية.

الإنشاء المعياري (Modular Construction)

الغطاء الحراري يتم تجهيزه المسبق في معايير ونماذج بمساحة ٣٠٥ ملمتر مربع والتي يمكن بسهولة وبسرعة إنشائها في الموقع. توجد طرق مختلفة في تصنيع وتركيب هذه النماذج.

(١)- الكتلة المتطابقة التي تتكون من غطاء من عدة طبقات مدمجة في عنصر واحد ٣٠٥ ملمتر × ٣٠٥ ملمتر وموضوعة في طبقة من المونة (الملاط). يتم لحام المعدن الممتد في الغطاء المعدني للفرن بعد عملية اللصق. النماذج يتم وضعها كإضافة. هذه الطريقة سهلة وغير مكلفة في الاستخدام وتوفر إمكانيات جيدة للإصلاح. يمكن استخدامها في حالة الأشكال الهندسية المعقدة. وهي تعطي خفض في العزل الحراري عندما تكون الشعيرات عمودية على السطح الداخلي. وفي حالة الكتل المدمجة حيث تكون الشعيرات موازية لداخل الفرن. والتي تتكون كذلك من كتل ملفوفة، فإنها تعطي في هذه الحالة أقصى عزل حراري حيث تكون الشعيرات موازية لجدار الفرن.

التليس بطبقة أو قشرة خارجية (Veneering)

عند استخدام هذه الطريقة فإن الشعيرات يمكن استخدامها فوق التبطين الحراري التقليدي الذي يكون في شكل جيد. وهذا يتضمن استخدام نماذج من سمك مصنوع من شرائط معلقة مع بعضها مع نسج عضوي ذو فتحات. الأركان الأربع عبر النموذج هي غراء مصهور ساخن الذي يمسك النسج مع بعضه. كلا من الغراء والنسيج يحترق عند بدء اشتعال الفرن. هذه النماذج يتم كلا من الغراء والنسيج يحترق عند بدء اشتعال الفرن. هذه النماذج يتم إنشائها باستخدام مونة يمكن أن تتطلب بالهواء.

تطبيقات شعيرات السيراميك:

شعيرات السيراميك هي حل اقتصادي وكفء لمشاكل العزل في الأفران حيث لا يوجد التصاق مباشر مع المعدن المنصهر.

بعض البيانات المفيدة الخاصة بالعزل بالحراري أو بشعيرات السيراميك موضحة في الجدول الآتية:

جدول بيانات حرارية للحوائط بسمك ٣٥ سم حيث درجة حرارة الوجه الساخن ١٧٦٠ °م

نوع الحرارية	درجة حرارة الوجه البارد °م	المتوسط التقريبي لتدفق الحرارة كيلو كالوري/ متر مربع في الساعة
طفل حراري	٢٣٨	٤٠٧٠
٧٠% ألومينا	٢٤٩	٤٤٥٠
٩٠% ألومينا	٢٨٨	٥٨٣٠
سيليكات	٢٦٨	٤٩٦٠
كروم	٢٧٩	٢٣٧٠
ماجنيزيت	٣٥٢	٨٩٠٠
(forsterite)	٢٦٠	٤٦١٠

جدول تأثير شعيرة السبراميك على العزل:

البخاري	البخارية	درجة حرارة الوجه البارد °م	الوقت كليلة كالوري م ^٢ × الساعة	نسبة الخفض في الحرارة %	حفظ الحرارة كليلة كالوري م ^٢	نسبة الخفض في الاحتفاظ بالحرارة %
المسبك الخزاري	المسبك الخزاري	٩٥	٧٧٢	-	٩٣.٢٣	-
٢٢٩ ملليمتر	٢٢٩ ملليمتر	٨٠	٥٦٠	٧٧,٥	٧٠.٧٧٧	٢٣,٩
١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	٧٤	٤٨٥	٣٧,٠	٦٢٧٤١	٣٢,٦
١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	١١٤	١٠٦٠	-	١٢٥٧٣	-
١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	٩٨	٨١٠	٢٣,٦	٩٨٧٣٣	١٩,٨
١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	٩٢	٧١٨	٣٩,٣	٨٩٠١٨	٢٧,٤
١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	١٢٩	١٣٢٠	-	٣٦٣٥٧	-
١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	١٠٨	٩٦٠	٢٧,٢	٢٩٨٩١	١٧,٨
١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	١١٤ ملليمتر (١٠٩٢°م)	١٠٠	٨٣٢	٣٦,٩	٢٧٣٠٦	٢٤,٩

الفصل الرابع

4

الحراريات الخاصة

Special Refractories

المواد الحرارية ذات الأسعار العالية تستخدم في صناعة البوتقة (crucible)، الأفران التجريبية وأغراض خاصة أخرى حيث وهذه تشمل الحراريات عالية النقاء (silicides, nitrides, borides, oxides) و (alundum) وهو خليط من الطفل والسيليكا المنصهرة، السيلالونز (silalons) وهذه مجموعة مواد من (N - O - Al - Si)، وحراريات السبك الكهربائي، الخزف الفلزي (cermets)، السيليمانيت (sillimanite).... الخ. ولكن بعض من هذه المواد لم يصبح عاديا بسبب قيود تصنيعها. الحراريات الخاصة تستخدم أساسا في الأفران المستخدمة في إنتاج المعادن النادرة والشمينة وكذلك تلك التي تعمل عند درجات الحرارة العالية جدا حيث لا يقبل أي تلوث للمعدن المنتج. بسبب التكلفة العالية لإنتاج الحراريات الخاصة (حيث تتطلب عمليات تصنيع خاصة ومواد عالية النقاء) فإن استخدامها في التطبيقات العادية غير وارد. فمثلا، محطات الطاقة النووية، التربينات الغازية، ومحركات الدفع النفاث التي تعمل في درجات الحرارة العالية تتطلب استخدام أكاسيد عالية النقاء لها قوة صلابة عالية ومقاومة عالية للتقشر.

زركونيا (ZrO_2) ، زركون (ZrO_4) ، كربيد السيليكون، (ThO_2) Thoria، (BeO) Berellia، الألومينا (Al_2O_3)، الماغنيزيا (MgO) ، السيليكا (SiO_2) وحراريات السبك الكهربى للموليت (mullite) ، الماغنيزيت وخليط من الماغنيزيا والبوكسيت والكروميت هي بعض من الحراريات الخاصة. مختصر عن هذه الحراريات الخاصة سيتم الإشارة إليه كالاتي:

الحراريات الفائقة (Super Refractories)

الأكاسيد عالية النقاء (ذات نقطة انصهار مرتفعة جدا) التي يمكن استخدامها ملتصقة مع المعدن المنصهر في ظروف الأكسدة تستخدم لعمل الحراريات الفائقة. يتم تحميص الأكاسيد النقية/ صهرها في أفران كهربية حيث يتم بعدئذ تبريدها ثم تكسيرها ثم طحنها إلى مسحوق ناعم. نظرا لأن الأكاسيد النقية تكون غير لدنة، فإنه يتم تشكيلها تحت ظروف الضغط العالي ودرجة الحرارة العالية. التشكيل يمكن كذلك عمله بواسطة السبك المنزلق (slip casting)، البثق، وكبس الضغط العالي أو الكبس على الساخن. المواد العضوية اللدنة تضاف أحيانا لإضافة اللدونة إلى المخلوط. أثناء الحرق تحت الظروف الجوية والحرارية المسيطر عليه، فإن المادة العضوية تحترق مع حدوث إعادة التبلر عند التسخين والذي يزيد كثيرا من كثافة المنتج الحراري.

الطوب الحراري من الأكاسيد عالية النقاء يكون عالي الكثافة ومقاوم لدونانية الخبث. وهو خامل نسبيا لـ N_2 , H_2 ، النشادر والمجال الجوي للكربوني أو الكبريتي بجانب قوته الميكانيكية العالية والثبات عند درجة الحرارة العالية. أكاسيد (berellia), (thoria), (zirconia) للألومنيوم والمغنسيوم، السيليوم....الخ تقع تحت هذا التصنيف للحراريات. ثوريا (Thoria) التي هي مادة مشعة تنصهر عند أكبر من ٣٠٠٠ °م وتستخدم لعمل البوتقة المستخدمة في صهر بعض المعادن عالية النقاء. يستخدم (berellia) في صناعة بوتقات صهر الزركونيوم والبريليوم. الخ. وهو يستخدم كذلك في الأفران المقاومة للكربون كدروع إشعاعية. تستخدم الألومينا كمادة بري (abrasive) في قطع الصخور وفي الحفارات وفي تحميل الدرجة الاسطوانية (roller)

عند درجات الحرارة العالية. وتستخدم كذلك في صناعة فيوزات الشرر، للقياسات الحرارية، وفي الأنابيب الكهربائية، قطع الأنف للصواريخ...الخ. يستخدم السيليكا النقية في عمل الأطباق، البوتقات، الأنابيب، وألواح المزدوج الحراري (thermo sheets)....الخ. تستخدم المجنيزيا في صناعة بوتقات صهر البلاتين والنيكل. تستخدم الزركونيا في عمل بوتقات (لصهر أنواع خاصة من الزجاج والطلاءات الغير معدنية السيراميكية (glazes)، وفي صناعة المزدوج الحراري، أطراف الموقد....الخ. كما تستخدم في تبطين أفران السيراميك عالية درجة الحرارة كغطاء حامل للحرارة للمحركات النفاثة. حراريات الزركون تستخدم في حراريات صهر الألومنيوم والغلايات. الاستخدام الحجري (monoliths) للحراريات الفائقة يوفر زيادة في مقاومة التآكل والبري للبطانات بدون لصق وبذا يقلل تسرب الهواء والحرارة ويؤكد التحكم الأفضل في الجو. مونة الحراريات الفائقة، أسمنت الحراريات وخططات (patch mixes) تستخدم في وضع الحراريات الفائقة وكذلك في صيانة البطانة التي بها تلف. استخدام الحجر المونوليث (monoliths) تقلل للتكاليف الكلية بتجنب تصنيع واستخدام المهارات في وضع أشكال مكلفة خاصة.

حراريات كربيد السيليكون (Silicon Carbide)

الخواص الهامة لحراريات كربيد السيليكون (الذي يحتوي على أكبر من ٨٥% SIC) والذي يجعلها مناسبة للاستخدام في أشغال السيراميك، للمعدن والعمليات الصناعية هي:

- توصيل حراري عالي ومقاومة حرارية عالية (يتحلل عند ٢٢٠٠ °م ولا ينصهر).
- المقاومة لتقشر الحرارة العالية وزيادة طاقة التحميل عند درجات الحرارة العالية.
- الخواص الميكانيكية الممتازة والكيمائية الخاملة وخاصة بالنسبة لسبخ

الحامض.

- الوزن الخفيف (الجاذبية النوعية الحقيقية = ٣,١).

هذه الحراريات تستخدم في فني محركات الصواريخ، قطع أنف الصواريخ، المقاومات الكهربائية،

حراريات السيلالون (Sialon Refractories)

منتجات السيراميك من مركبات الأكسيد والمونو أكسيد (Monoxide) التي تجمع الكثافة العالية والقوة العالية. المحلول الصلب (Solid Solution) من الألومينا في نيتريد السيليكون الذي اشتق منه هذا الاسم Si-Al-O-N - (Sialon) ، وهو مثال محدد لهذه المجموعة من مادة السيراميك. بسبب الخواص الضعيفة للتليد (Sialons)، الضغط على الساخن عند ضغط (18-30-MPa) ودرجة حرارة ١٧٠٠ - ١٧٦٠ °م في قوالب من الجرافيت ويتم للحصول على منتج كثيف منخفض المسامية. الضغط على الساخن لخليط السيليكا والألومنيوم في جو من النيتروجين عند ١٤٠٠ °م.

السيالونز (sialons) له مقاومة جيدة للأكسدة وتأثير المعادن المنصهرة مثل الألومنيوم، الزنك، النحاس، الحديد والصلب. كذلك لا تتأثر بحامض الكبريتيك والهيدروليك والبوراكس والقلويات وبذلك تكون مناسبة لتعبئة ونقل تلك المواد.

السيرميت (Cermets)

السيرميت هي الجمع بين المعدن أو السبيكة ومادة غير معدنية مثل الأكسيد، الكريد، النيتريد، البورايد. سيرميت تنتج من خليط السيراميك (مثل الأكاسيد، الكريد، اليورايد....الخ) والمعادن أو السبائك (سيراميك + معدن = سيرميت). السيرميت يجمع بين الخواص الجيدة لكل من السيراميك (الذي له قساوة وهشاشة، وله مقاومة منخفضة للصدمة الحرارية وقوة عالية عند درجات الحرارة العالية)، والمعادن أو السبائك (الذي له مرونة ولكن يفقد القوة عند التسخين). المواد السيراميك المستخدمة في إنتاج مادة السيرميت عادة أكاسيد عالية النقاء (مثل UO_2 , ZrO , BeO , MgO , SiO_2).

Cr₂O₃, Al₂O₃.... الخ)، أو الكرييدات عالية النقاء (مثل تلك للسيليكون، التيتانيوم، TU.... الخ) أو Borides (مثل تلك للألومنيوم، للتيتانيوم، الزركونيوم.... الخ). المجال المعدني المستخدم في إنتاج السيرميت يمكن أن يكون Mn, Ni, Fe, Co, Cr, Be, Al ، الصلب المقاوم...الخ.

السيرميت ينتج بتشغيل مساحيق المجال السيراميكي والمجال المعدني إلى أشكال مدجة بالضغط والتلبيد كما يتم في المسحوق الميتالرجي. المجال المعدني يعمل كمادة ربط لحبيبات المجال السيراميك. القوة العالية ومقاومة درجات الحرارة العالية تجعلهم مناسبين للاستخدام في التطبيقات الخاصة جدا والحديثة مثل تلك في الصواريخ ومحطات الطاقة النووية.

الحراريات المصهورة كهريا والمسبوكة

Fused and Electro cast Refractoies

تنتج الحراريات المنصهرة المسبوكة بصهر الخليط المطلوب للمواد الخام في فرن القوس الكهربائي ثم تشكيل الشكل المطلوب في قوالب من الجرافيت في حوالي أسبوع من الزمن.

عند تلدين (Annealing) المنتج النهائي يتم للحصول على خواص أفضل ومتجانسة. الألومينات السيليكا، الألومينا - الزركونيا، الكروم - الألومينا والألومينا هي مواد خام عادية لإنتاج الحراريات المنصهرة المسبوكة.

الألومينا المصهورة المسبوكة تنتج بصهر الألومينا عالية النقاء (المحتوي على أكثر من 99% Al₂O₃) أو البوكسيت عند 2000°م. ولها قوة مقاومة حرارية عالية جداً، ومقاومة للاحتكاك، المقاومة الحرارية تحت الأحمال، والثبات الكيميائي والخمول في الظروف عالية الأكسدة أو الاختزال. وهي مستخدمة في تبطين المفاعلات من الكربون الأسود، قباب المفاعلات الكيميائية في مصانع الأسمدة، وفي مفاعلات إنتاج الغاز من البترول، والوحدات الخاصة الأخرى مثل غرف الحرق في إنتاج الأسيتيلين، وفي عمليات التكسير باستخدام العامل الوسيط وإعادة التأهيل في

معامل تكرير البترول....الخ حيث تكون درجات الحرارة والضغط العالي وحالات الاختزال العالية (شاملة وجود الهيدروجين الساخن). حراريات السبك الكهربى للأومينا ٩٩% تستخدم في الأفران الدوارة، المحولات، مدخن الفرن العالية، غرف إزالة الغازات بالتفريغ لسبائك الصلب الخاصة وفي إنشاء المجرمة لفرن إعادة التسخين.

الزركونيا المسبوكة كهربيا، الماغنيزيت والكورندم تستخدم لعمل البوتقات لأفران الحث الفراغى لصهر السبائك الثمينة ذلك لأنها عالية المقاومة للمعادن المنصهرة. الزركونيا المسبوكة كهربيا من MgO , Cr_2O_3 , Al_2O_3 (مع بعض من Fe_2O_3) له مسامية مفتوحة منخفضة (٠,٧ - ١,٨%)، وإجهاد كسر على البارد مرتفع (١٠٥٠ كجرام/سم^٢) ، ومقاومة حرارية عالية تحت التحميل (١٧٥٠ °م تحت حمل ٢ كجرام/سم^٢). وهذه تستخدم في تبطين الأجزاء المعرضة للبلل في عدم وجود صدمة حرارية مقابل حزام الخبث، مجرمة أو قاع أفران التسخين المستمر المستخدم في مواد السلفيد (sulphide) الماغنيزيا المنصهرة زاد استخدامها حاليا في البوابات المنزلقة في إنتاج الصلب.

الفصل الخامس

5

المونة الأسمنتية الحرارية الكتل القابلة للانضغاط والسبك

Refractory Cement Mortars, Castables and Ramming Masse

المونة أو الأسمنت الحراري هي مواد ربط حرارية لها درجة حرارة انصهار مرتفعة (مثل الماغنيزيت، الزركون، السيليكا، البوكسيت، الطفل الحراري، الكربون القاعدي) وتستخدم كمواد لصق لوضع الحرارية. يجب ، أن تكون قادرة على توفير رباط قوي بين الحرارية ومقاومة أداء الفرن السائد مثل الحرارية الرئيسية المستخدمة في الفرن. طبقا لاستخدامها سواء لوضع حراريات حامضية أو قلوية أو متعادلة فإن المونة الحرارية يجب اختيارها طبقا لذلك. بودة الكوارتز المخلوطة مع حامض الأكزاليك، عادة تنتج مونة مقاومة للحامض. المونة الجافة يتم تحويلها إلى الحالة العجينية بإضافة الماء قبل الاستخدام مباشرة. المونة يجب ألا تنكمش كثيرا عند التسخين وإلا فإنه ينتج عن ذلك تفكك وصلات الحراري.

المونة الحرارية لوضع الطفل الحراري أو السيليكا الحرارية تنتج بخلط مسحوق الحرارية المستخدمة (سواء كانت قاعدية، أو طفل حراري، أو كوارتز

قلوي أو سيليكاً، كتل الرمل أو الكوارتز)، كيانيت (kyanite)، الطفل اللدن وإضافات. بالمثل المونة ذات الأساس من البوكسيت (المستخدمة لوضع الحارري عالي الألومينا) تنتج بخلط مسحوق البوكسيت والماجنييت، كسر الطوب الحارري، سيليكات الصوديوم وإضافات أخرى. المونة ذات الأساس من الجرافيت أو الكوك المحتوية على ٢٥% من الطفل الحارري تستخدم في وضع حراريات الكربون. أسمنت السيليكاً (المستخدم في وضع حراريات السيليكاً ينتج بخلط مسحوق كسر السيليكاً والطفل الحارري اللدن حيث عند الخلط بالماء ينتج مادة زلقة جيدة. أسمنت المغنسيوم (المستخدم في وضع حراريات المغنسيوم) ينتج بخلط الماجنيزيا البلورية، كلوريد المغنسيوم/ أو كبريتات المغنسيوم والماجنيزيا المحترقة قليلاً. أسمنت الكروم المتعادل يمكن استخدامه في وضع أي نوع من الحراريات. يمكن كذلك استخدامه كبديل لأسمنت الطفل الحارري وعدم حدوث فواصل الانكماش حيث الوصلات السمكية يكون من الصعب تجنبها. المونة ذات الأساس من الزركون تستخدم لتبطين الحراريات الحامضية وذات الأساس من الزركون. الأسمنت الألوميني (المستخدم في وضع الطفل الحارري، حراريات الألومنيوم عالية الأداء أو فائقة الأداء) تحتوي أساس ألومينات الكالسيوم مع كميات مختلفة من SiO_2 ، Fe_2O_3 . وهي تحتوي عادة على نسب متساوية من CaO ، Al_2O_3 (حوالي ٤٠%) مع الحد الأقصى من SiO_2 (٣٣%) وأكسيد الحديدوز وأكسيد الحديد. الأسمنت عالي الألومينا يحتوي على ٧٠ - ٩٠ % ألومينا، ١ % SiO_2 ، وأكسيد الحديد. الأسمنت الألوميني (aluminous) يستخدم كذلك لتوفير غطاء رقيق للسطح الداخلي للحوائط التي تواجه درجات حرارة تشغيل مرتفعة.

رابط الحارري (binder) يمكن أن يكون الهواء، الكيماويات، الشك الحارري (heat setting). الشك بالهواء للمونة يسبب القوة عند الجفاف بسبب وجود سيليكات الصوديوم التي تضاف بأقل كمية بما يكفي لمجرد إحداث خواص الشك بالهواء لأنها تقلل قدرة المقاومة الحرارية للمونة. الشك الحارري للمونة يسبب القوة عند التسخين فقط إلى درجة حرارة عالية عند حدوث غليان وتزجيج. الإضافات الموجودة في معظم

المون/ الأسمنت تسبب قوة شك على البارد في الحراري ورباط مستمر قوي يتم تكوينه عند تسخين المنشأ إلى درجة حرارة مرتفعة. أسمنت الشك الهوائي أفضل من أسمنت السيراميك بالشك الحراري يسبب الرباط الجيد القوي الذي يتكون مع استمرار التسخين عدا في حالة انخفاض القوة قريبا من نقطة الانصهار.

المسبوكات (Castables)

المسبوكات هي حراريات ليس لها شكل معين أحادي مثل الكتل المضغوطة. وهي خليط جاف هيدروليكي مكون من كسر الحراري مع مادة ربط مناسبة التي عند إضافة الماء لها تنتج كتلة تشبه الخرسانة المكونة للمسبوك المقيد. هذه المواد القابلة للسبك والتي تسمى (castables) عليها طلب كبير. التسخين حتى درجات الحرارة العالية يحدث رباط سيراميكي في الأشكال المسبوكة. كسر الحراري (الذي لم يحدث له تغير بنائي عند التسخين) يستخدم في عمل المواد القابلة للسبك المشتملة على البوكسميت، كسر الطفل الحراري، السيليمانيت ومواد ألومينا أخرى أو كرومايت.... الخ. تستخدم المواد الحرارية القابلة للسبك في إنتاج مادة التبطين بجانب أعمال الترميم، استخدامها يعمل على تجنب التخزين والحفظ لعدد كبير من الأشكال المعقدة ويقلل من عدد الوصلات في المنشأ بما يزيد من عمر طبقة البطانة وتقليل أعمال الصيانة. الحرارية التي ليس لها شكل محدد مثل (castables) لها المميزات الآتية مقارنة بالحراريات ذات الشكل المحدد:

- تسهيل المنشآت بدون وصلات مع عدم وجود أضعف منطقة في المنشأ في وصلات الطوب.
- تحتاج إلى قليل من أعمال الجرد والحصص.
- يسهل إنشائها بما يقلل من التكاليف.
- سهولة عملية الإصلاح لمناطق البلي والاحتكاك للصيانة بما يحقق زيادة عمر الخدمة لبطانة/ منشأ الحراري.

يتم خلط هذه المواد القابلة للسبك (castables) جيدا في الشكل الجاف قبل الاستخدام لتجنب الفصل للحبيبات مختلفة الأحجام أثناء النقل. يوجد عمر محدد لهذه المواد لأن مادة الربط المستخدمة في هذه المنتجات تكون من نوع الشك الهيدروليكي. الخليط الميكانيكي (باستخدام خلاط المجداف - paddle mixer) لحبيبات الحراري الجافة مع الماء تنتج منتج له إجهاد كسر على البارد مرتفع. زمن الخلط يكون من ٢ - ٣ دقيقة مع استخدام الكمية الصحيحة من الماء.

مادة (castable) التي تم خلطها بالماء يجب استخدامها خلال ١٠ - ١٥ دقيقة بعد إضافة الماء إلى الكاستابل الجاف لتجنب حدوث الشك الأولي. يمكن سبك الكاستابل بالصب، أو بالتسوية (بالمسطرين) أو بالقذف بمدفع قذف (gunning) طبقاً لمناسبة الغرض. يمكن كذلك استخدامها بالكس والحشر، أو الكبس. استخدام الهزاز أثناء عملية الكبس يساعد في إزالة الهواء.

يجب عدم حدوث أي فقد في المياه من خليط الكاستابل أثناء استخدامه حتى حدوث الشك نظراً لأن قوته تزداد بسبب التفاعل الكيميائي المنتج للحرارة بين الأسمنت عالي الألومينا الذي يحدث له الشك بالأداء الهيدروليكي والماء المستخدم أثناء الخلط مسبباً ارتفاعاً في درجة الحرارة.

هيكل الحفظ المستخدم في وضع الكاستابل عادة يكون من الخشب بطلاء من الزيت، البارافين أو غلاف معدني لتكون أدوات الحفظ مانعة لنفاذ المياه. يجب عدم وجود أي مواد غريبة في هذا الغلاف. أثناء الإصلاح فإن سطح الحراري الموجود المستخدم يجب أن يكون غير ماص وذلك برش كمية كافية من الماء لتنتشع بطانة الحراري التي سيتم استخدام مادة الكاستابل عليها.

تستخدم الأربطة إما المعدنية (سبيكة الصلب) أو الحرارية لتحمل الحرارة والظروف الأخرى في مكان الاستخدام العملي للكاستابل. يجب ألا يتم جفاف سطح الكاستابل خلال الأربع وعشرين ساعة الأولى بعد الإنشاء (بالرش المنتظم للماء) وليس سريعاً خلال الساعات التالية. سطح طبقة الكاستابل يجب عدم تشطيه إلى حد

النعمومة. يتم توفير تقويع صغيرة في المنادة لتسهيل الجفاف من داخل سمك الطبقة. رغم أن الجفاف اللتام يستحيل عند درجة الحرارة العادية، فإن الجفاف يتم عند التسخين الأولي عند معدل بطيء. يتم التسخين الأولي لطبقة البطانة من الكاستابل بمعدل 30°C في الساعة. تستمر درجة الحرارة عند 110°C لمدة نصف ساعة لكل سمك قدرة ٢٥ ملليمتر من طبقة الكاستابل. عندئذ يتم رفع درجة الحرارة بمعدل $50 - 60^{\circ}\text{C}$ في الساعة ثم الاستمرار عند درجة حرارة 220°C لمدة نصف ساعة. يمكن استمرار الحرارة عند $500 - 1000^{\circ}\text{C}$ عند اللزوم. أخيراً يكون معدل التسخين بمعدل 100°C كل ساعة أعلى من 1000°C حتى درجة حرارة التشغيل. يحدث للكاستابل خفض كبير في القوة في مجال درجة حرارة ما بين $600 - 1100^{\circ}\text{C}$ والذي يمكن مراجعته والذي يمكن إيقاف حدوثه بإضافة شعيرات الصلب المقاوم (بقطر ٠,١٢٥ - ١,٥ ملليمتر، وبطول ٥ - ٧٥ ملليمتر) في خليط الكاستابل إلى ما قدره ٣% من الحجم. الهبوط في القوة عند حوالي $700 - 800^{\circ}\text{C}$ يمكن كذلك منع حدوثه باستخدام مسحوق فوسفات الألومنيوم حتى ٥% إما منفصلاً أو مع الأسمنت العالي الألومينا بالاشك الهيدروليكي (SETTING). طبقاً لخواص التمدد والانكماش للكاستابل عند درجة حرارة التشغيل يتم توفير الإمكانات الخاصة بالتمدد والانكماش. يتم توفير وصلات التمدد بإدخال مواد قابلة للاشتعال مثل الخشب، الورق المقوى، ألواح البلاستيك... الخ. على مراحل مختلفة. بالمثل يتم ترك فتحات محددة (والتي تسمى CUT-Joints) عند مراحل محددة لضبط الانكماش للكاستابل.

حراريات البلاستيك:

حراريات البلاستيك تحفظ في عبوات مائنة للرطوبة حيث يتم إخراجها من العبوة قبل الاستخدام مباشرة. وهذه تتوفر دائماً في شكل كتلة رطبة ليست مثل المسحوق الجاف للكاستابل. عادة لا تتم الحاجة إلى إضافة ماء في أثناء الاستخدام. حجم الكتلة يتم اختياره عادة بحيث تكون طبقة الكتلة الواحدة هي السمك الكلي للبطانة

المطلوب استخدامها. كتل الحراريات البلاستيك يتم وضعها إما بالطريقة اليدوية بالدك أو بالكبس الهوائي. كما في حالة الكاستابل تستخدم أدوات التثبيت (anchors) (من المفضل أن تكون من الحراريات) في تثبيت حراريات البلاستيك كذلك. حراريات البلاستيك لها مقاومة عالية للاحتكاك وتستخدم في الأماكن حيث يمكن عمل الدمك تقليديا وحيث يكون الصلب أو التسوية يصعب تنفيذها. لتسهيل الجفاف فإنه لا يتم تنعيم السطح المعرض للعمل مع اتخاذ الإجراءات المشابهة لتلك للكاستابل أثناء عمليات التسخين والتجفيف.

المراجع

1. American Petroleum Institute, Classification of Fuels for Different Purposes. National Conference for Fuel Engineering – 1995 Oakland-Cal.f.
2. Reforming of Gasoline for Environmental Protection API Conference in 1985 Calif-June 1985.
3. Hand Book of Furnaces.S.S.Dara. in 2004 University of Nagpur India – 2004

Hand Book of Refractories by O.P.CUPTA Khanna Publishers. Fourth Edition 1998 New Delhi India.

المحتويات

الباب الأول : الوقود

- الفصل الأول : مقدمة عن الوقود وتقسيماته..... ٩
- الفصل الثاني : الوقود الصلب..... ٣٩
- الفصل الثالث : الوقود السائل..... ٧٢
- الفصل الرابع : الوقود الغاز..... ١١٦

الباب الثاني : الأفران Furnaces

- الفصل الأول : الأفران Furnaces..... ١٥٩
- الفصل الثاني : استعادة الحرارة العادمة في الأفران..... ١٨١
- الفصل الثالث : الانتقال الحراري في الأفران..... ٢٢٥
- الفصل الرابع : تقسيم الأفران..... ٢٣١
- الفصل الخامس : حسابات الميزان الحراري للفرن..... ٢٣٨

الباب الثالث: احراريات Refractories

- الفصل الأول : احراريات Refractories..... ٢٤٧
- الفصل الثاني : اختبارات احراريات Testing of Refractories..... ٣٣٣
- الفصل الثالث : احراريات العازلة Insulating Refractories..... ٣٧٩
- الفصل الرابع : احراريات الخاصة Special Refractories..... ٣٩١
- الفصل الخامس : المونة الأسمنتية الحرارية الكتل القابلة للانضغاط والسبك..... ٣٩٧

ف: 20 تاريخ استلام: 23/8/2007



• الوقود • الأفران • الحرارية

تناول هذا الكتاب موضوعات الوقود والأفران والحراريات وذلك لما لهذه الموضوعات الثلاث من أهمية بالغة في جميع العمليات الصناعية والتنمية وخاصة في عمليات الصناعات المعدنية والغلايات التي تجمع بين هذه الموضوعات الثلاث. وتم اعداد هذا الكتاب في ثلاث أبواب :

حيث شمل الباب الأول على أنواع الوقود واستخداماته الصلب والسائل والغاز

وأما الباب الثاني تم تناول أنواع الأفران المختلفة مع التركيز على عملية ترشيد الطاقة سواء بالنسبة لتصميم الأفران أو استعمالها

وأخيرا الباب الثالث فقد تم فيه دراسات تفصيلية عن أنواع الحراريات من المواد الخزفية والمعدنية والغير معدنية وخصائصها واستعمالاتها . ويعتبر هذا الإصدار إضافة إلى المكتبة العربية يستفاد به في تلك المجالات.

والله الموفق

الناشر

Bibliotheca Alexandrina



0624897

دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع

٥٠ شارع الشيخ ريجان - عابدين - القاهرة

٧٩٥٤٢٢٩ ☎

www.sbh-egypt.com

e-mail : sbh@link.net

ISBN 977-287-686-8



9 789772 876860